STAUB-EXPLOSIONEN

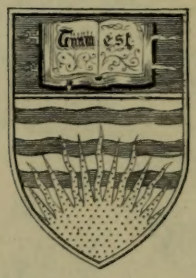
VON

PAUL BEYERSDORFER

DRESDEN UND LEIPZIG
VON THEODOR STEINKOPFF

STORAGE-ITEM
MAIN LIBRARY

LPA-B31D
U.B.C. LIBRARY



Library
of the University of
British Columbia

Accession No. 53519
Call No. QD 516. B4

Berichtigungen.

1. S. 24 3. Zeile von unten.
   Statt: „Holzkohlenpulver im“ lies: „Holzkohlenpulver in“.
2. S. 27 5. Zeile von oben.
   Statt: „Hahnes C“ lies: „Hahnes B“.
3. S. 45 4. Zeile von oben.
   Statt: „1:1,300“ lies: „1:1300“.
4. S. 58 6. Zeile von unten.
   Statt: „einschränkende Umstand“ lies: „einschränkender Umstand“.
5. S. 66 15. Zeile von unten.
   Statt: „Fäßer“ lies: „Fässer“.
6. S. 67 1. Zeile von unten.
   Statt: „von da abfällt“ lies: „von da ab fällt“.
7. S. 99 2. Zeile von oben.
   Statt: „gebracht und so günstigere . . . “ lies: „gebracht. So werden günstigere . . . “.
8. S. 110 6. u. 7. Zeile von oben.
   Statt: „viel/ fach“ lies: „viel-/ fach“.
9. S. 117 14. Zeile von oben.
   Statt: „selbst, wenn“ lies: „selbst wenn“.

STAUB-EXPLOSIONEN

VON

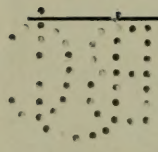
DR.-ING. PAUL BEYERSDORFER

TECHNISCHER DIREKTOR DER CHEMISCHEN WERKE
SCHUSTER & WILHELMY A.-G., REICHENBACH, OBERLAUSITZ

MIT 14 ABBILDUNGEN

DRESDEN UND LEIPZIG
VERLAG VON THEODOR STEINKOPFF
1925

ALLE RECHTE VORBEHALTEN
COPYRIGHT 1925 BY THEODOR STEINKOPFF,
DRESDEN UND LEIPZIG



Druck von C. G. Röder G.m.b.H., Leipzig. 897525.

Printed in Germany

Vorwort.

Die Staubexplosionen sind ein technisches Problem. Die Forschungen darüber können noch nicht als abgeschlossen betrachtet werden. Über die aus den vorliegenden wissenschaftlichen Untersuchungen und den Beobachtungen der Praxis zu ziehenden Schlüsse und Nutzanwendungen gehen die Ansichten zum Teil noch auseinander.

Darum ist die Frage berechtigt, ob jetzt schon das Bedürfnis vorhanden ist für ein Buch wie dieses. Wir glaubten die Bedürfnisfrage bejahen zu müssen schon im Hinblick auf die drei Fragen, denen man allenthalben begegnet:

„Gibt es denn überhaupt Staubexplosionen?", fragen die meisten.

„Warum gibt es so viele Staubexplosionen?", fragen die „Staubtechniker".

„Warum gibt es nicht noch mehr Staubexplosionen?", fragt darauf der Forscher.

Das Buch möchte sich an alle wenden, die mit explosionsfähigem Staub zu tun haben: an die Betriebsleiter in stauberzeugenden Industrien, an die Beamten der Gewerbeaufsichtsbehörden, Berufsgenossenschaften, Feuerversicherungen und Berufsfeuerwehren und nicht zuletzt an die interessierten Ingenieure, Physiker und Chemiker.

Die bedeutendsten Experimentalarbeiten über Staubexplosionen sind so ausführlich wiedergegeben worden, zum Teil wörtlich, daß das Studium des Originals für den Forscher oft entbehrlich sein dürfte. Dies geschah mit Rücksicht auf die schwere Zugänglichkeit der Literatur, namentlich der älteren, die vielfach in Fachzeitschriften einzelner Industriezweige oder gewerblicher Vereine verstreut ist.

Das mitgeteilte statistische Material ist nur ein Ausschnitt. Es soll dem Fernerstehenden nur einen Überblick über die tatsächliche Gefährlichkeit des Staubes geben. Andererseits könnte eine vollständige Statistik schwerlich gebracht werden. Die deutsche Statistik über Staubexplosionen ist unvollkommen oder schwer zugänglich. Nur katastrophale Explosionen werden im allgemeinen bekannt; die kleineren bleiben in der Regel Geheimnis der Betriebe.

Die Frage der Staubexplosionen soll in dem Buch auf Grund der vorliegenden Erfahrungstatsachen von möglichst allgemeinen Gesichtspunkten aus an Hand der Schulbeispiele erörtert werden. — Nicht in der Absicht des Buches liegt es, für spezielle Staubarten gültige Angaben über Ursache und Verhütung von Explosionen zu machen; schon aus dem einfachen Grund: weil dies nicht geht. „Eines schickt sich nicht für alle." Jede Staubart, jeder stauberzeugende Betrieb will individuell behandelt sein.

Das Buch ist ein Versuch, ein Anfang. Es weist noch Lücken auf. Verfasser wäre für Hinweise auf die Lücken und für ergänzende Berichte dankbar, um im Bedarfsfalle das Versäumte nachholen zu können.

Möge das Buch anregen zu weiteren praktischen Beobachtungen und wissenschaftlichen Forschungen, auch zu vorbeugenden technischen Einrichtungen und so mithelfen, vor Explosionen zu bewahren und wertvolle Menschenleben und Güter zu erhalten! — Dann hat es seinen Zweck erfüllt.

Reichenbach (O.-L.), im Mai 1925.

P. Beyersdorfer.

Inhaltsübersicht.

Seite

Vorwort III

Inhaltsübersicht V

Verzeichnis der Tabellen VIII

Verzeichnis der Figuren IX

I. Häufigkeit und Mannigfaltigkeit der Staubexplosionen 1

II. Der Staub 3

Definition — Teilchengröße — Oberflächeneigenschaften — Brownsche Bewegung — Staub, ein Kolloid.

III. Die Explosion 13

Definition — Die drei Faktoren einer Verbrennung — Die Explosionsgrenzen — Die Entzündungstemperatur — Die Explosionswelle — Der Explosionsdruck — Unterschied zwischen Gas- und Staubexplosion.

IV. Die gefährlichen Eigenschaften des Staubes. 17

Teilchengröße und Teilchenabstand — Deren Beziehung zu den Explosionsgrenzen — Explosionsgrenzen, Entflammbarkeit und Entzündungstemperatur technischer Stäube nach den Arbeiten von Vital, Weber, Stockmeier, Bauer, Weinmann, Engler, Holtzwart u. v. Meyer, Taffanel u. Durr, Wheeler, Brown u. Mitarbeiter, Beyersdorfer, Trostel u. Frevert.

Kritische Betrachtung über Entzündungstemperatur und Explosionsgrenzen.

Die Berechnung der Explosionsgrenzen.

V. Die gefährlichen Energieformen 57

1. Die Wärme 57

Unmittelbare Wärme: Flamme und Glut.

Reibungswärme: Lagerreibung — Reibung bewegter Maschinenteile aneinander — Heißwerden großer Fremdkörper — Funkenzündung (Erfahrung und Theorie).

Joulesche Wärme: Elektrische Lampen — Kurzschluß — Erdschluß.

Reaktionswärme: Pyrophore Kohle — Autoxydation.

Seite

2. Die statische Elektrizität 66

Riemenelektrizität.

Staubelektrizität: Elektrostatische Staubexplosionen — Einfluß der Erdung.

Theorie der elektrostatischen Zündung: Berechnung der Energie einer gleichmäßig geladenen Staubwolke — Der elektrostatische Druck der Staubwolke — Die zur Entzündung der Staubwolke nötige Energie — Die Grundbedingung der elektrischen Staubexplosion — Die zur Selbstentzündung notwendige elektrische Aufladung der Staubteilchen — Prüfung der Theorie an der Erfahrung — Elektrische Ladung und Teilchengröße — Elektrische Zündung durch Kompression einer elektrisch geladenen Staubwolke.

VI. Staubexplosionen — Gasexplosionen 87

Die gemischte Staub-Gasexplosion — Die reine Staubexplosion.

VII. Staubexplosionen — Staubgewitter 92

Analogie zu Naturereignissen — Die günstigsten Staubgewitterbedingungen im Betrieb — Einfluß von Trockenheit und Wärme.

VIII. Verlauf und Wirkung einer Staubexplosion. 96

Die maschinelle Einrichtung einer Mühle: Zerkleinerungsmaschinen — Siebvorrichtungen — Förderanlagen.

Die Staubexplosion, eine Summe von Teilexplosionen — Explosionsfortpflanzung durch Kompression.

Die Explosion der Washburn Flower Mills zu Minneapolis (2. Mai 1878) — Die Explosion in der Zuckerfabrik Frankenthal am 16. Mai 1917.

IX. Die Gefahren des ruhenden Staubes 102

Überschätzung der Gefährlichkeit des schwebenden Staubes — Die Gefährlichkeit des Staubsammlerstaubes — Die Gefährlichkeit selbst dünner Staubschichten.

X. Die Verhütung von Staubexplosionen 106

1. Die Bekämpfung des Staubes 106

Die „freie" Zerkleinerung — Staubentfernung durch Sichten — Zweckmäßige Förderung — Die Entstaubung — Zentralisation oder Dezentralisation? — Leistung des Ventilators — Entstaubungsrohre — Staubsammler — Staubvernichter — Staubverdünnung — Staubbindung — Die dünnen Staubschichten.

2. Die Bekämpfung der Energie 113

a) Der Kampf gegen die Wärme.

Direkte Wärmequellen — Elektrische Beleuchtung — Elektrische Leitungen — Elektromotore — Heißlaufen von Lagern, bewegten Maschinenteilen, Fremdkörpern — Die Funkenzündung — Pyrophore Kohle — Brennglaswirkung.

Seite

b) Der Kampf gegen die statische Elektrizität.

Riemenelektrizität: Leitendmachen der Riemen — Ableitung der Elektrizität.

Staubelektrizität: Erdung der Maschinengehäuse — Erdung der Antriebswellen — Ableitung der Staubelektrizität durch metallische Leiter — Durch leitend gemachte Luft.

3. Die Bekämpfung des Sauerstoffs 118

Zerkleinern in inerter Gassphäre — Zerkleinern in gereinigter Rauchgassphäre.

4. Die räumliche Beschränkung von Staubexplosionen 120

Bau und Einrichtung der Mühlenanlage — Explosionsschlote und -klappen — Auch kombiniert mit dem Gesteinsstaubverfahren — Sprinkleranlagen.

5. Erziehung des Personals 123

Verzeichnis der Tabellen.

Seite

I. Teilchenabstand und Explosionsgrenzen 19
II. Die untere Explosionsgrenze von Mehlen nach Weber 22
III. Relative und niedrigste Entzündungstemperatur von 66 Staubarten nach Wheeler 28
IV. Einfluß der Zündtemperatur auf die Entflammbarkeit 35
V. Relative Entflammbarkeit organischer Staubarten, gemessen am Explosionsdruck 35
VI. Relative Entflammbarkeit verschiedener Kohlenarten 39
VII. Versuche zur Ermittlung der unteren Explosionsgrenzen einiger Staubarten 48
VIII. Untere Explosionsgrenzen einiger Staubarten 50
IX. Entzündungstemperaturen einiger Gase in Luft 51
X. Temperaturen elektrischer Lampen 64
XI. Elektrische Ladung und Teilchengröße 84
XII. Wärmetönung bei der Autoxydation von „Zuckergas“ 90
XIII. Die zulässige Dicke dünner Staubschichten 105

Verzeichnis der Figuren.

1. Vorrichtung zur quantitativen Bestimmung der elektrischen Aufladung von Stäuben 8
2. Vorrichtung zur Bestimmung der unteren Explosionsgrenze nach Weber 21
3. Vorrichtung zur Bestimmung der unteren Explosionsgrenze nach Bauer 23
4. Vorrichtung zur Bestimmung der relativen Entzündungstemperatur nach Wheeler 26
5. Vorrichtung zur Bestimmung der niedrigsten Entzündungstemperatur nach Wheeler 31
6. Vorrichtung zur Bestimmung der relativen Entflammbarkeit nach Clement-Frazer 34
7. Kurve: Der Einfluß brennbarer Gase auf die Entflammbarkeit von Staub-Luftgemischen 40
8. Vorrichtung zur Bestimmung der absoluten Entzündungstemperatur nach Beyersdorfer 41
9. Kurve: Die Entzündung von Zuckerstaub in Sauerstoff-Stickstoff-mischungen 44
10. Vorrichtung zur Bestimmung der unteren Explosionsgrenze nach Trostel-Frevert 47
11. Zündungsmöglichkeiten der Elementarvolumina einer Staubwolke durch Funken 63
12. Wirkung einer Zuckerstaubexplosion 101
13. Schutzvorrichtung: Kombination von Explosionsklappe mit Gesteins-staubverfahren 121
14. Erzieherisch wirkendes Plakat nach einem amerikanischen Vorbild . 124

Anmerkung: Die Bildstöcke zu den Abbildungen 12 und 14 wurden liebenswürdigerweise von den Geckwerken, Maschinenbauanstalt, Worms a. Rh., überlassen.

I. Häufigkeit und Mannigfaltigkeit der Staubexplosionen.

Staubexplosionen sind häufiger und die Zahl der explosionsfähigen Stäube ist größer als gemeinhin bekannt ist.

Nach Aufzeichnungen der Turiner Akademie der Wissenschaften (1) ist anzunehmen, daß die erste als solche erkannte Staubexplosion sich in Italien am 14. Dezember 1785 ereignet hat. Es war eine Mehlstaubexplosion. — Kohlenstaub wird, wenn auch nicht als unmittelbare Ursache einer Explosion, so doch als Anlaß deren katastrophaler Heftigkeit wohl zum erstenmal von Faraday genannt. Dieser berichtete am 17. Januar 1845 in seinem Vortrag in der Royal Institution über die Explosion in den Haswell-Kohlenbergwerken vom September 1844, daß die Entzündung und Explosion schlagender Wetter wohl die Ursache war, daß aber wahrscheinlich durch die Mitexplosion des durch die Schlagwetterexplosion aufgewirbelten Kohlenstaubes die Explosion so katastrophal wurde, daß durch sie der Schauplatz des Unglücks im Nu in einen „glühenden Ofen" verwandelt wurde.

Die erste deutsche Staubexplosion, von der wir Kunde haben, fand 1858 in der Stettiner Walzenmühle statt. Die Frage nach der Ursache dieser Explosion wurde in der Sitzung der Polytechnischen Gesellschaft zu Berlin vom 22. Dezember 1858 erörtert (2).

In den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts hören wir von drei weiteren Staubexplosionen: 1860 von einer Mehlstaubexplosion in Milwaukee, Wis. (3). Die Mühle wurde zum Teil zerstört; Ursache: Laterne. 1864 von einer Mehlstaubexplosion in Mascoutah, Ill. (3). Die Mühle wurde vernichtet; Ursache: Lampe. 1869 von einer Erbsenmehlstaubexplosion in Deutschland (4). Der Schaden war nur örtlich — Decke angekohlt; Ursache: Lampe.

Von 1870 an häufen sich die Staubexplosionen, sicher als Folge der zunehmenden Industrialisierung, als Folge der Umstellung gewerblicher

Klein- in industrielle Großbetriebe. Dort, wo die Fabrikation und Entstehung staubfeiner Produkte die größten Ausmaße annahmen — bedingt durch die Vergrößerung des Umfanges der Betriebe wie durch Steigerung der Arbeitsintensität —, mußten auch die meisten Staubexplosionen vorkommen. So fanden bis zum Jahre 1922 in Nordamerika (Vereinigte Staaten und Kanada) etwa 220 Staubexplosionen statt. In der Hauptsache handelt es sich um Explosionen organischer Stäube.

Die amerikanische Statistik (3) verzeichnet für den genannten Zeitraum

34 Explosionen in Mehlmühlen,
34 „ „ Getreidespeichern (Elevators),
30 „ „ Futter- und Getreidemühlen,
19 „ „ Stärke- und ähnlichen Fabriken,
13 „ „ Brauereien und Mälzereien,
12 „ „ Zuckerraffinerien,
27 „ „ Holz verarbeitenden Werken,
48 „ verschiedener anderer Staubarten, wie Aluminium 2, Zelluloid 1, Schokolade 2, Kork 6, Baumwolle 5, Dünger 11, Milchpulver 1, Papier 2, Grammophonplattenstaub 2, Gummi 2, Shoddy 2, Seife 1, Gewürze 2, Schwefel 6, natürliche Gerbstoffe 2, Mischstaub aus Pelz, Holz und Mehl 1.

Die gleiche Statistik führt 24 Staubexplosionen an, die sich in Europa bis zum Jahre 1921 ereignet haben. Begreiflicherweise ist diese Statistik sehr unvollständig. Sie enthält nur 2 deutsche Zuckerstaubexplosionen, während die deutsche Statistik von 1922 für den Zeitraum von 1893 bis 1921 (5) deren 8 katastrophale, 9 mittlere und etwa 50 kleine verzeichnet. Auch eine große Anzahl Aluminiumstaubexplosionen (6) hat in Deutschland stattgefunden, die ebensowenig wie die Rußstaubexplosion (7), die 1885 im Schwarzwald sich ereignet hat, unter den 24 genannten Explosionen aufgeführt sind.

Die Zahl der deutschen und europäischen Staubexplosionen ist sicher bei weitem größer als hier angegeben (siehe Vorwort!). Verfasser hat durch Privatmitteilung Kenntnis von 10 Explosionen, die in Kugelmühlen stattgefunden haben beim Vermahlen synthetischer organischer Farbstoffe.

Ein Kapitel für sich sind die Kohlenstaubexplosionen, von denen immer noch alljährlich unsere Steinkohlenbergwerke und Brikettfabriken heimgesucht werden. Die preußische Statistik (8) verzeichnet für den Zeitraum von 1904 bis 1923 in den preußischen Gruben 54 reine Steinkohlenstaubexplosionen — die weit größere Zahl der in der Regel weniger folgenschweren Schlagwetterexplosionen ist in dieser Zahl nicht inbegriffen! —,

von denen 53 verschiedene Gruben betroffen worden sind. Diese Steinkohlenstaubexplosionen forderten insgesamt 679 Opfer, und zwar 404 Tote, 76 schwer und 199 leicht Verletzte. In den Vereinigten Staaten von Nordamerika kamen allein im Jahr 1907 durch Explosionen in Kohlenbergwerken 1148 Menschen um. Davon entfallen auf den Monat Dezember des gleichen Jahres allein 648 Menschen, welche infolge von Kohlenstaubexplosionen ihr Leben lassen mußten (2). — In deutschen Braunkohlenbrikettfabriken fanden im Jahre 1923 18 Kohlenstaubexplosionen (8) statt, bei denen 28 Personen verunglückt sind (1 Toter, 6 schwer und 21 leicht Verletzte). Steinkohlenbrikettfabriken wurden im Jahre 1923 nicht von Kohlenstaubexplosionen betroffen.

Die bisher verzeichneten Explosionen haben im wesentlichen die Industrie heimgesucht; aber auch der Landwirtschaft droht die Explosionsgefahr. In den U. S. A., und zwar allein in Pacific Northwest wurden während einer einzigen Ernteperiode durch über 300 Staubexplosionen an Dreschmaschinen Werte von mehr als 1 Million Dollars vernichtet. Während einer größeren Zahl anderer Ernteperioden bewegte sich der Schaden zwischen 15000 und 75000 Dollars (9).

Dieses statistische Fragment muß genügen, die durch brennbaren Staub drohende Explosionsgefahr darzutun.

Literatur.

1) Amer. Miller 17 (1889); S. 20.
2) Verh. Polyt. Ges. 1858.
3) D. J. Price und H. H. Brown: Dust Explosions. Herausgegeben von der National Fire Protection Association, Boston, Mass. (Abkürzung: Dust Expl.), S. 235.
4) Stenogr. Ber. 3. Vers. Dtsch. Müller, S. 53.
5) P. Beyersdorfer: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 72 (1922), S. 477.
6) H. Stockmeier: Beilg. z. Ber. Bayr. Gewerbemuseums, Nürnberg 1904, S. 3.
7) C. Engler: Chem. Ind. 8 (1885), S. 171.
8) Ztschr. Berg-, Hütt.-, Sal.-Wesen 72 (1924), S. 262.
9) Dust Expl., S. 162.

II. Der Staub.

Alle festen Stoffe können in Staubform vorkommen.

Im Alltagssprachgebrauch versteht man unter Staub eine Fülle äußerst kleiner Teilchen beliebiger fester Stoffe, gleichviel ob sie in Schichten irgendwo aufliegen oder in der Luft herumwirbeln. Gleichzeitig ist mit dem Begriff Staub etwas Lästiges, Unangenehmes verbunden.

Das, was man in Betrieben, deren Zweck die Zerkleinerung von Stoffen ist, unter Staub versteht, hat mit dem Alltagsstaub im wesentlichen nur den physikalischen Zustand, die Teilchengröße, die Feinheit, gemein, nicht aber die chemische Zusammensetzung. Die technischen Stäube sind in der Regel in den einzelnen Betrieben chemisch einheitlicher Natur.

Nach ihrer Entstehung kann man zwei Gruppen technischer Stäube unterscheiden:

1. Staub, der ungewollt als unwillkommenes Nebenprodukt bei der Zerkleinerung anfällt. Man kann ihn auch das überzerkleinerte Gut nennen.

2. Staub, der Endzweck der Fabrikation ist. Man spricht dann in der Regel nicht von Staub, sondern von Mehl, Pulver, Puder.

Für alle Stäube kennzeichnend ist der Feinheitsgrad. Dieser bedingt alle die Eigenschaften, in denen der Staub von dem gleichen gröberen, stückigen, festen Stoff abweicht. Wir werden im folgenden sehen, daß Teilchengröße und Teilchenabstand die Eigenschaften eines Stoffes weitgehend ändern können.

Durch die mikroskopische und ultramikroskopische Untersuchung von Staub wurde das Vorhandensein aller Größenordnungen festgestellt, von Amikronen über Submikronen bis zu Mikronen und größeren Aggregaten, das sind Teilchen vom Durchmesser weniger Milliontel Millimeter an aufwärts (1).

Diese Teilchen haben eine im Vergleich zu ihrem Volumen große Oberfläche. Je kleiner die Teilchen werden, um so größer wird das Verhältnis

$$\text{Oberfläche: Volumen } (O/V).$$

Die Staubteilchen seien Kugeln vom Durchmesser d. Dann wird

$$\frac{O}{V} = \frac{d^2\pi}{\frac{1}{6}d^3\pi} = \frac{6}{d}.$$

Für $d = 10^{-5}$ (das ist in Zentimeter die mittlere Größe echter Staubteilchen) wird

$$\frac{O}{V} = 6 \cdot 10^5.$$

Für $d = 1$ hingegen wird

$$\frac{O}{V} = 6, \text{ also } 100000 \text{ mal kleiner.}$$

Anschaulicher wird das Verhältnis Oberfläche: Volumen durch folgende Betrachtung:

Wir stellen uns einen massiven Würfel von 1 dm Kantenlänge vor. Sein Volumen ist dann 1 ℓ, seine Oberfläche $6\ \text{dm}^2 = 6 \cdot 0{,}01\ \text{m}^2$. Zer-

schneiden wir den Würfel durch Schnitte parallel zu den 3 Koordinatenebenen in $10 \cdot 10 \cdot 10$ Würfel von 1 cm Kantenlänge, dann wird die Oberfläche eines jeden solchen Teilwürfels $6\ cm^2 = 6 \cdot 0{,}0001\ m^2$ und die Oberfläche der 1000 Würfel $6 \cdot 0{,}1\ m^2$. Führen wir die dezimale Teilung weiter fort, so finden wir, daß die Summe der Oberflächen aller Würfel, deren Gesamtvolumen 1 dm^3 ist, beträgt, wenn die Kante eines Teilwürfels gleich

10^{-1} cm = 1	mm	ist:	6 m^2	
10^{-2} cm = 0,1	mm	„	60 m^2	
10^{-3} cm = 0,01	mm	„	600 m^2	
10^{-4} cm = 0,001	mm = 1 μ	„	6000 m^2	
10^{-5} cm = 0,1	μ	„	60000 m^2 =	6 ha
10^{-6} cm = 0,01	μ	„		60 ha
10^{-7} cm = 0,001	μ = 1 $\mu\mu$	„		6 km^2
10^{-8} cm = 0,1	$\mu\mu$ = 1 Å	„		60 km^2.

Jede Oberfläche hat die Eigenschaft, das gasförmige Medium, von dem sie umspült wird, zu adsorbieren. Da Staubteilchen im Vergleich zu ihrem Volumen eine sehr große Oberfläche haben, sind sie befähigt, relativ große Gasmengen an ihrer Oberfläche festzuhalten. Wir wissen heute mit großer Wahrscheinlichkeit, daß die Dicke der adsorbierten Gashaut etwa mindestens gleich ist dem Durchmesser einer Molekel, das sind 10^{-8} cm. Neuere Rechnungen und Messungen sprechen dafür, daß die Dicke der adsorbierten Gasschicht etwa von der Größenordnung 10^{-7} cm ist (2). Stellen wir uns der Einfachheit halber die Molekeln als Würfel der Kantenlänge 10^{-8} cm vor, dann ist ihre Grundfläche, mit der sie an der adsorbierenden Fläche adhärieren, $10^{-16}\ cm^2$. Es sitze nun Molekel an Molekel. Dann sitzen auf einem Staubteilchen mit der Oberfläche $6 \cdot 10^{-10}\ cm^2$ (Kante 10^{-5} cm, Volumen $10^{-15}\ cm^3$)

$$\frac{6 \cdot 10^{-10}\ cm^2}{10^{-16}\ cm^2} = 6 \cdot 10^6 \text{ Gasmoleküle.}$$

Aus unserem $dm^3 = 10^3\ cm^3$ haben wir durch Teilung $\frac{10^3}{10^{-15}} = 10^{18}$ Staubteilchen der Größenordnung 10^{-5} cm erhalten. Von dieser Trillion Staubteilchen sind sonach, da eines allein 6 Millionen Gasmoleküle an seiner Oberfläche festhält, $6 \cdot 10^6 \cdot 10^{18} = 6 \cdot 10^{24}$ Gasmolekeln adsorbiert. Da $6 \cdot 10^{23}$ Gasmolekeln gerade 1 Mol sind und bei 0° und 760 mm den Raum von 22,4 ℓ einnehmen, sind von der betrachteten Staubmenge 10 Mol, entsprechend 224 ℓ, Gas adsorbiert. Für Luft sind es rund 290 g, für Sauerstoff 320 g.

Die Gesamtoberfläche aller Teilchen ist $60000\,m^2 = 6 \cdot 10^8\,cm^2$. Die Dicke der adsorbierten Schicht sei zu 10^{-8} cm angenommen; dann wird ihr Volumen

$$6 \cdot 10^8\,cm^2 \cdot 10^{-8}\,cm = 6\,cm^3.$$

Auf diesem Raum sind die $224000\,cm^3$ Gas verdichtet. Das adsorbierte Gas steht also unter einem Druck von

$$224000 : 6 \sim 37000\text{ at.}$$

Wenn wir annehmen, daß die gleiche Anzahl Gasmolekeln eine zehnmal so dicke Schicht, nämlich 10^{-7} cm, erfüllen, so wird der Druck $^1/_{10}$ des eben errechneten, das sind immer noch nahezu 4000 at.

Wenn auch diese Zahlen nur problematischen Wert haben sollten, so zeigen sie doch, was für gewaltige Kräfte im Staub schlummern.

Die Aufnahme der Gase durch Adsorptionsmittel hängt im allgemeinen nur von der Natur der Gase ab, und zwar derart, daß die am leichtesten komprimierbaren auch am ehesten verdichtet werden (3). Von den Hauptbestandteilen der Luft ist dies der Sauerstoff. Sonach dürfte vom Staub unverhältnismäßig mehr Sauerstoff adsorbiert werden als Stickstoff. Man ist heute geneigt, dem Vorgang der Adsorption eine gewisse Tiefenwirkung zuzuerkennen (4). Massive Körper behalten im Innern trotz dieser Tiefenwirkung ihre ursprüngliche Zusammensetzung, nicht aber äußerst feine Staubpartikelchen, wie ganz dünne Lamellen — und den Staub darf man wohl als solche auffassen. Ist das Staubteilchen noch einmal so dick oder dünner als die Tiefe, bis zu welcher z. B. der Sauerstoff bei der Adsorption in den festen Körper einzudringen vermag, dann wird seine Zusammensetzung bei diesem Vorgang sich ändern. Man hat dann nicht mehr den massiven Stoff, sondern gleichsam eine Lösung des Stoffes im Sauerstoff oder umgekehrt. Die feinsten Stäube können also gewissermaßen Sauerstofflösungen oder -legierungen sein.

Dafür, daß Staub bald nach seiner Bildung bereits Gas adsorbiert hat, hat Georg Jaeckel (5) durch einen einfachen Versuch den experimentellen Nachweis erbracht. Er hat 200 g Plattenzucker in einer kleinen, luftdicht verschlossenen Kugelmühle zermahlen. Nach 24 Stunden — solange wurde nur gewartet, um die Druck- und Temperaturbedingungen wie zu Beginn des Versuches zu haben — konnte er in der Mühle einen Unterdruck von 23 mm Quecksilbersäule feststellen. Dieser Unterdruck kann nur durch Adsorption von Luft an den frisch geschaffenen großen Oberflächen entstanden sein.

Die Erscheinung des Unterdruckes in Kugelmühlen nach beendeter Feinmahlung kann bei hermetisch schließenden Mühlen in der Betriebs-

praxis beobachtet werden. Gleichgültig, welcher Stoff vermahlen wird, ob er organischer oder anorganischer Natur ist, der Verschluß der Kugelmühle kann stets nach beendeter Mahlung nur mit einem gewissen Kraftaufwand — ähnlich wie der Deckel eines Weckglases — geöffnet werden. Beim Öffnen beobachtet man das Hineinströmen der Außenluft. Infolge der beim Mahlen entstehenden Wärme herrschen sogar unmittelbar nach beendeter Mahlung in der Mühle Bedingungen (Wärmeausdehnung), die dem Unterdruck entgegenwirken. Und doch ist dieser erkennbar; ein Beweis dafür, daß viel Luft adsorbiert worden ist.

Eine Folgeerscheinung der Tatsache, daß bei sehr kleinen Teilchen das Verhältnis $\frac{O}{V} = \frac{6}{d}$ sehr groß wird, ist die Eigenschaft submikrospischer Teilchen, einmal aufgewirbelt, sich sehr lange in der Schwebe zu halten und als Sonnenstäubchen ihren ungeordneten Zickzacktanz, die sog. Brownsche Bewegung, in der Luft zu vollführen.

Diese kleinen Teilchen folgen nicht mehr ausschließlich dem Zuge der Gravitation, sie gehorchen nicht mehr den bekannten Gesetzen des freien Falles. Sie bewegen sich nicht mehr durch die Luft nach der einfachen Beziehung $v^2 = 2gs$ (v = Geschwindigkeit nach zurückgelegtem Wege s; g = Erdbeschleunigung), sie folgen einer anderen, von Stokes-Cunningham abgeleiteten Gesetzmäßigkeit, die ihren Ausdruck findet in der Formel (6)

$$u = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 (\varrho - \varrho_g)\, g}{\eta} \left(1 + A \frac{l}{r}\right),$$

worin bedeutet: u die Geschwindigkeit des fallenden Teilchens, r sein Radius, ϱ seine Dichte; ϱ_g die Dichte und $\eta = 0{,}00018$ g cm^{-1} · sec^{-1} die Zähigkeit der Luft; l die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle; g die Erdbeschleunigung 981 cm · sec^{-2}, A eine Konstante, die, wenn alle Moleküle elastisch reflektiert werden, den Wert 0,805 hat.

Nach dieser Gesetzmäßigkeit ist die Fallgeschwindigkeit proportional dem Quadrate des Radius, sowie der Differenz der Dichten des Staubteilchens und der Luft und umgekehrt proportional der absoluten Zähigkeit der Luft.

Um die Brownsche Bewegung zu ermöglichen, müssen die Staubteilchen aber nicht nur sehr klein, sie müssen außerdem noch alle im gleichen Sinne elektrisch geladen sein. Nur die gleichnamige elektrische Ladung ermöglicht es, daß im Zickzacktanz zusammenprallende Teilchen sich nicht zu größeren und schwereren Aggregaten zusammenballen, sondern daß sie sich abstoßen. Auf die elektrische Ladung der Staubteilchen

wollen wir, in Anbetracht der weittragenden Bedeutung derselben, ausführlicher eingehen.

Statische Elektrizität entsteht bekanntlich durch Reibung, richtiger Trennung. Jeder feste oder flüssige Stoff wird durch Reibung — mit darauffolgender Trennung — an einem anderen Stoff der beiden Aggregatzustände elektrisch. Man hat versucht, Gesetzmäßigkeiten aufzufinden, wie das Vorzeichen der elektrischen Ladung von der chemischen Zusammen-

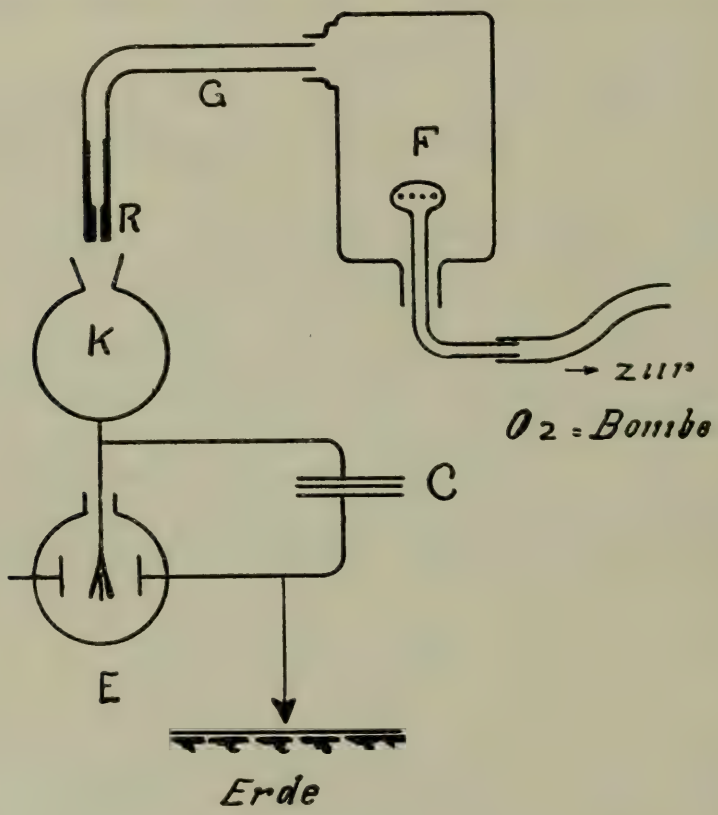


Fig. 1.
Vorrichtung zur quantitativen Bestimmung der elektrischen Aufladung von Stäuben.

setzung der Stoffe abhängt (7,8). Eine exakte, allgemeingültige Gesetzmäßigkeit konnte aber noch nicht ermittelt werden. Für unsere Betrachtungen genügt es zu wissen, daß chemisch einheitliche Stoffe (Stäube) gleichnamig elektrisch aufgeladen werden. Die elektrische Ladung bekommt der Staub gleich bei seiner Entstehung mit auf den Weg.

Das Zerkleinern ist bekanntlich, gleichgültig in welcher Mahlmaschine es geschieht, in erster Phase ein Komprimieren. Sobald die Kohäsionskräfte dem Kompressionsdruck nicht mehr standhalten können, zerspringt das größere Teilchen in viele kleine. Durch die dabei auftretende, je nach

der Natur des Stoffes mehr oder weniger beträchtliche Reibung an den eigentlichen Mahlwerkzeugen der Mühle werden die zerkleinerten Teilchen elektrisch aufgeladen. Schon Volta (9) hat dies experimentell auf einfachste Art für den Zucker nachgewiesen. Er schabte von einem Stück Zucker mit einem Messer kleine Teilchen ab und fing diese auf der Platte eines Elektroskops auf. Die Blättchen schlugen aus.

Aber nicht nur beim Entstehen wird der Staub elektrisch. Bereits vorgebildeter, irgendwo in Schichten herumliegender Staub wird, durch irgendeine Ursache aufgewirbelt, elektrisch. Straßenstaub, der vom Windstoß oder von irgendeinem Fahrzeug aufgewirbelt wird, zeigt elektrische Ladung (10); ebenso wie technischer Staub, der durch Rohrleitungen gesaugt worden ist (11). Durch ein einfaches Experiment kann man sich von dieser Erscheinung überzeugen. Bläst man irgendeinen Staub durch ein enges Rohr aus beliebigem Stoff (Metall oder Stein, Glas oder Kautschuk) in eine Metallschale, die mit einem Elektroskop leitend verbunden ist, so kann man beobachten, daß wenige Milligramm Staub Spannungen von mehreren 100 Volt erkennen lassen (12).

Durch Wirbeln von Zuckerstaub mittels Druckluft in einem isoliert aufgestellten kupfernen Gefäß konnten Spannungen von mehreren 10000 Volt erzeugt werden: es gelang, Funken bis zu 1 cm Länge aus dem Gefäß herauszuziehen (13).

Diese hier angedeuteten Versuche machen alle nur qualitative Ausgaben über die elektrische Aufladung des Staubes. Es ist aber wichtig zu wissen, wie stark der Staub elektrisch aufgeladen ist. Quantitative Messungen hierüber wurden von Beyersdorfer und Jaeckel (14) mit Zuckerstaub durchgeführt. Der Staub wurde mit komprimiertem Sauerstoff durch eine Kupferkapillare von 1 mm Durchmesser geblasen. Der zur Kapillare austretende Staub mußte quantitativ in eine Hohlkugel einströmen, die mit einem geeichten Elektrometer, dem eine Kapazität (200 cm) parallel geschaltet war, in leitender Verbindung stand. Durch Messung wurde festgestellt, daß 3,7 mg Zuckerstaub das Elektrometer auf 470 Volt aufgeladen hatten. Da

$$\text{Ladung} = \text{Kapazität} \cdot \text{Spannung}$$

und

$$470 \text{ Volt} = \frac{470}{300} = 1{,}57 \text{ el. stat. Einh.},$$

beträgt die Ladung der 3,7 mg Zuckerstaub

$$1{,}57 \cdot 200 = 314 \text{ el. stat. Einh.}$$

Die Ladung/g Staub beträgt somit

$$\frac{314 \text{ el. stat. Einh.}}{0{,}0037 \text{ g}} = 8{,}5 \cdot 10^4 \text{ el. stat. Einh./g.}$$

Wird der Staub aus der Kapillare in die Luft geblasen, so beobachtet man, daß ein Teil des Staubes sich sehr rasch zu Boden setzt, während ein anderer Teil verhältnismäßig lange im Schwebezustand verharrt. Das dürfte im wesentlichen daher rühren, daß beim Passieren der Kapillare nur ein Teil des Staubes sich hinreichend stark auflädt, und zwar der Teil, der seinen Weg längs der Wandung der Kapillare nimmt. Die in der Mitte der Kapillare strömenden Teilchen können sich nicht nennenswert aufladen, da sie in bezug auf den Gasstrom ruhend gedacht werden müssen. Wir wollen darum nur die Teilchen als geladen betrachten, die unmittelbar an der Wand der Kapillare entlang gestrichen sind.

Die Staubteilchen seien Kugeln vom Durchmesser 10^{-5} cm. Das Gewicht eines Teilchens ist dann, das spezifische Gewicht des Zuckers $s = 1{,}6$ gesetzt,

$$8{,}4 \cdot 10^{-16} \text{ g.}$$

1 g besteht folglich aus $1{,}2 \cdot 10^{15}$ Teilchen. Um angenähert den Raum zu berechnen, den diese Teilchen erfüllen, wenn sie als Kugeln in die Kapillare hineingepackt werden, machen wir die Annahme, daß dieser Raum den Mittelwert darstellt aus den beiden Packungen, die man erhält, wenn man einmal sich die Kugeln dicht in Würfel eingesetzt denkt und alle diese Würfel eng auf- und aneinander setzt, und wenn man zum andernmal sich die Kugeln zu Würfeln umgeformt denkt und diese den Kugeln inhaltsgleichen Würfel wiederum dicht zusammensetzt. Für den ersten Fall ist das von einem Teilchen besetzte Volumen 10^{-15} cm³, das von den $1{,}2 \cdot 10^{15}$ Teilchen eingenommene mithin 1,2 cm³. Für den zweiten Fall sind die entsprechenden Werte

$$\frac{4\pi \cdot 10^{-15}}{3 \cdot 8} = 0{,}524 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ und } 0{,}63 \text{ cm}^3.$$

Der Mittelwert ist 0,915 cm³, was einem Raumgewicht von 1,09 entspricht. Diese Zahl stimmt mit dem für festgestampften Zuckerstaub experimentell ermittelten Wert 1,0 befriedigend überein.

Jetzt kann die Zahl der an der Wand der Kapillare liegenden bzw. sich reibenden Teilchen berechnet werden. Diese Zahl erhalten wir, wenn wir uns die Kapillare mit den 0,915 cm³ Staub gefüllt denken und aus diesem erfüllten Volumen und dem Durchmesser der Kapillare die Höhe des gefüllten Zylinders berechnen. Diese Höhe ist offenbar

$$h = \frac{4V}{d^2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 0{,}915}{0{,}1^2 \cdot \pi} \text{ cm} = 116{,}5 \text{ cm.}$$

Die von den Kugeln belegte Fläche ist dann gleich dem Rechteck aus Höhe und Umfang der Kapillare ($u = d \cdot \pi$). Es wird also

$$M = h \cdot u = 36{,}6\ \text{cm}^2.$$

Wenn wir den Mantel M mit den Kugeln so dicht als möglich belegen, so nehmen, wie eine einfache Überlegung zeigt, je 4 Kugeln vom Durchmesser d in Anspruch das Flächenstück

$$\triangle F = 2d \cdot \sqrt{3} \cdot d = 3{,}464\, d^2 = 3{,}464 \cdot 10^{-10}\ \text{cm}^2 \quad (d = 10^{-5}\ \text{cm}).$$

Mithin liegen auf der ganzen Fläche $N = 4{,}2 \cdot 10^{11}$ Teilchen. Nur diesen Teilchen kommt die gemessene Ladung von

$$8{,}5 \cdot 10^4 \text{ el. stat. Einh., entsprechend } 1{,}78 \cdot 10^{14} \text{ Elektronen}$$

zu. Folglich kommen auf 1 Teilchen 420 Elektronen (15).

Wenn wir uns die Eigenschaften vergegenwärtigen, die wir bisher als für den Staub charakteristische kennengelernt haben, wie

ultramikroskopische Teilchengröße,
Brownsche Bewegung und
elektrische Ladung,

so erkennen wir, daß das alles Eigenschaften sind, die den Kolloiden zukommen.

Wir wollen im folgenden versuchen, die Berechtigung der Einordnung der technischen Stäube in die Welt der vernachlässigten Dimensionen darzutun.

Die Größe echter Staubteilchen — ca: 10^{-5} cm — ist die gleiche wie die der gröberen bekannten Kolloidteilchen. In kolloiden Goldlösungen z. B. sind Teilchen von 10^{-7} bis 10^{-6} cm Durchmesser gemessen worden. Als Durchmesser von Nebeltröpfchen wurden 10^{-5} cm ermittelt.

In der Luft schwebender Staub zeigt Tyndall-Effekt (Sonnenstäubchen) und Brownsche Bewegung. Alles Eigenschaften, die auch den echten Kolloiden zukommen.

Wenn man einer kolloiden Lösung Elektrolyte (Salze, Säuren, Basen) zusetzt, dann flockt der kolloidal gelöste Stoff aus, weil durch den Elektrolytzusatz ihm seine elektrische Ladung genommen wird. Die unelektrisch gewordenen Teilchen können beim Aufeinanderprallen sich nicht mehr abstoßen, sie ballen sich zu größeren Aggregaten zusammen und sinken, weil sie schwerer geworden sind, zu Boden. Das Kolloid gerinnt wie das in der Milch gelöste kolloide Eiweiß, das Kasein, wenn man z. B. Essig in Milch gießt. Das Kolloid koaguliert und sedimentiert, es geht aus dem Sol- in den Gelzustand über.

Ganz entsprechend verhält sich in der Luft schwebender Staub. Nimmt man den Staubteilchen ihre elektrische Ladung z. B. dadurch, daß man die Luft ionisiert, elektrisch leitend macht, genau so wie dies mit der wässerigen kolloiden Lösung, dem Hydrosol, durch den Elektrolytzusatz geschieht, dann sinken die unelektrisch gewordenen Teilchen, ihrer Abstoßungskraft beraubt, zu Boden. In der Technik macht man von dem Prinzip der Entziehung oder Neutralisierung der elektrischen Eigenladung des Staubes zu dessen Niederschlagung in dem bekannten Möller-Cotrellverfahren bereits Gebrauch.

Die Meteorologen (Schmauß) (16) fassen Nebel und Dunst, die man als flüssige Stäube bezeichnen könnte, mit Erfolg als kolloide Luftlösungen (Aerosole) auf. Den Meteorologen ist bekannt, daß bei beständig schönem Wetter die Luft ein geringes elektrisches Leitvermögen hat, während unmittelbar vor Eintritt von Regenwetter die elektrische Leitfähigkeit der Luft stark zunimmt. Auf diese starke Zunahme der Leitfähigkeit der Luft ist schließlich der Regen zurückzuführen. Das kommt so: Wird die Luft ein besserer Leiter der Elektrizität, so führt sie nach und nach die das Zusammenfließen verhindernde elektrische Aufladung der kolloiden Wasserteilchen dem Potential der Erde zu. Wenn der sog. isoelektrische Punkt nahezu erreicht ist, wenn die Teilchen nahezu unelektrisch geworden sind, dann müssen sie gleichsam koagulieren und als Regen sich niederschlagen.

Genau so verhält sich der Staub. Wenn schlechtes Wetter im Anzug ist, hält er sich bei weitem nicht solange schwebend in der Luft wie bei beständig gutem Wetter. Bei gutem Wetter hat man in stauberfüllten Räumen viel mehr den Eindruck der blauen Ferne, der Schönwettersicht, als bei schlechtem Wetter, wo dem Staub alsbald seine Ladung entzogen wird.

In der Ausdrucksweise der Kolloidwissenschaft können wir den schwebenden Staub als Aerosol und den ruhenden, den niedergeschlagenen Staub als Aerogel bezeichnen (17).

Staub ist ein typisch reversibles Kolloid, da er sich durch Aufwirbeln, durch Luftzug oder -stoß aus dem Gel- in den Solzustand überführen läßt. Beim Aufwirbeln bekommen die Staubteilchen durch Reibung an ihrer Unterlage wieder die für den Solzustand unerläßliche elektrische Aufladung.

Die Bedeutung der elektrischen Aufladung der Staubteilchen für die Staubexplosionen wird später klar werden.

Literatur.

1) P. Beyersdorfer: Ber. Dtsch. Chem. Ges. **55**, 2574 (1922).
2) H. Freundlich: Kapillarchemie, III. Aufl. (Leipzig 1923), 428.
3) R. Zsigmondy: Kolloidchemie, IV. Aufl. 1922, S. 84.

4) l. c. 1, S. 2595.
5) Gg. Jaeckel: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. **73**, 119 (1923).
6) l. c. 2, S. 1077.
7) W. A. D. Rudge: Phil. Mag., Ser. 6, 25; S. 481.
8) A. Coehn: Wied. Annal. Phys. Chem., N. F., **64**; S. 214.
A. Coehn und M. Raydt: Annal. Phys. 30; S. 804.
9) Volta: Opere I, 2; S. 259.
10) W. A. D. Rudge: On the Electrification Associated with Dust Clouds. Bloemfontein, S. Africa.
11) W. A. D. Rudge: Proc. Cambr. Phil. Soc. 1912—1914; 17; S. 249.
12) l. c. 1, S. 2585.
13) l. c. 1, S. 2584.
14) Gg. Jaeckel u. P. Beyersdorfer: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 73, 145 (1923).
15) P. Beyersdorfer: Kolloid. Ztschr. **33**, 104 (1923).
16) A. Schmauß: Meteorol. Ztschr. 1920, Heft 1/2.
17) l. c. 15, S. 102.

III. Die Explosion.

Unter Explosion im weitesten Sinne — auch Zerknall genannt — versteht man das plötzliche gewaltsame Zerspringen irgendeiner Sache aus beliebiger Ursache. Man spricht z. B. von der Explosion eines Schwungrades, wenn die Fliehkraft stärker wird als die Kohäsionskraft.

Im engeren Sinne versteht man unter Explosion jede plötzliche heftige Volumvergrößerung anläßlich eines physikalischen oder chemischen Vorganges. Wenn z. B. eine Bombe mit flüssiger Kohlensäure hinreichend stark erwärmt wird, dann zersprengt plötzlich das entstehende Gas sein Gefäß: die Bombe explodiert, zerknallt.

Die Mehrzahl der Explosionen sind spontane Verbrennungsvorgänge, die von starker Volumvergrößerung des ganzen Systems begleitet sind. Findet der gedachte Verbrennungsvorgang in einem geschlossenen Raum statt, so hat er die Zertrümmerung der ihn umhüllenden Wände zur Folge.

Die Staubexplosionen gehören wie auch die Gasexplosionen zu letzterer Kategorie. Die Staubexplosion ist also ein plötzlich mit großer Heftigkeit verlaufender Verbrennungsvorgang.

Geben wir uns zunächst einmal Rechenschaft darüber, welche Faktoren zum Zustandekommen einer Verbrennung erforderlich sind. Wenn wir die wesentlichen Faktoren — und nur diese — kennen, dann haben wir bereits einen Wegweiser, wie wir allgemein die Entstehung von Verbrennungen, im besonderen von Staubexplosionen, verhüten können.

Zum Zustandekommen einer Verbrennung ist die gleichzeitige Anwesenheit dreier und nur dreier Dinge nötig. Man braucht

1. einen brennbaren Stoff, für die Staubexplosion also brennbaren Staub,
2. Sauerstoff (Luft);
3. Energie.

In welcher Form die Energie dem System brennbarer Stoff — Sauerstoff zugeführt wird, ist belanglos. Es kann

1. Bewegungsenergie,
2. Wärmeenergie,
3. elektrische Energie sein.

Die Bewegungsenergie pflegt nicht unmittelbar eine Verbrennung einzuleiten oder auszulösen, sondern erst ihre Umwandlungsformen: die Wärme oder die Elektrizität.

Da eine Explosion das Produkt des gleichzeitigen Zusammentreffens der drei obengenannten Faktoren ist, kann sie nicht entstehen, wenn nur einer dieser Faktoren fehlt. Es kann also keine Staubexplosion entstehen, wenn nur Staub und Sauerstoff vorhanden sind bei Abwesenheit jeglicher Energie oder nur Staub und Energie bei Ausschluß von Sauerstoff. In der Atmosphäre eines inerten Gases, Stickstoff z. B., kann man einen explosionsfähigen Staub beliebig hoch erhitzen, es wird nicht zur Explosion kommen. Der Staub wird wohl schmelzen, sich vielleicht zersetzen, die Explosion aber ausbleiben.

Man könnte gegen die Allgemeingültigkeit des Gesagten hier einwenden, daß Explosiv- und Sprengstoffe auch bei Ausschluß von Sauerstoff, z. B. in einer Granate, lediglich durch Zufuhr von Energie zur Explosion gebracht werden. Dem ist entgegenzuhalten, daß Sprengstoffe entweder den zur weitgehenden oder vollkommenen Verbrennung notwendigen Sauerstoff bereits chemisch gebunden enthalten oder labile Verbindungen sind, die bei geringer Energiezufuhr unter Bildung reichlicher Gas- oder Energiemengen zerfallen (exotherme Reaktion).

Für das Zustandekommen einer Staubexplosion ist es aber nicht ausreichend, daß Staub, Sauerstoff und Energie überhaupt vorhanden sind. Diese drei Fundamentalfaktoren müssen vielmehr bei den Staub- wie auch bei den Gasexplosionen in einem bestimmten Verhältnis zueinander stehen.

Für die brennbaren Gase und Stäube ist innerhalb gewisser Grenzen ein wohl definiertes Mischungsverhältnis mit dem Sauerstoff (der Luft) nötig, um eine Explosion zu ermöglichen. Man nennt die Grenzen, innerhalb welcher nur eine Explosion möglich ist, die obere und die untere Explosionsgrenze. Die Entfernung dieser beiden Grenzen hängt von der Natur des

brennbaren Stoffes ab. Sie kann sehr groß sein, wie bei Azetylen, oder sehr klein, wie bei Benzindämpfen.

Für die eine Explosion auslösende Energie gibt es nur einen Mindestbetrag. Wird dieser Energiewert unterschritten, dann ist eine Explosion nicht möglich. Nach oben ist der Energie keine Grenze gezogen. Die zu einer Explosion erforderliche Mindestenergiezufuhr findet ihren Ausdruck in der sog. Entzündungstemperatur des Gases oder Staubes.

Wenn man die drei Kriterien: untere Explosionsgrenze, obere Explosionsgrenze und Mindestenergiebetrag für einen Staub kennt, dann hat man schon einen Einblick in seine Gefährlichkeit und außerdem einen Fingerzeig, wie groß man die drei Fundamentalfaktoren nur werden lassen darf, damit sie nicht das gefährliche Produkt der Explosion bilden können.

Nachdem wir die drei Faktoren kennengelernt haben, welche zu einer Explosion unerläßlich sind, wollen wir sehen, wie sie ihre Wirkung entfalten. Wenn eine Wärmequelle — ein glühendes Metallstück oder eine Flamme — in ein Gasluftgemisch oder in eine Staubwolke gebracht wird, dann findet zwischen den brennbaren Stoffen und dem Luftsauerstoff die Verbrennung statt. Zunächst haben wir den Zustand der langsamen Verbrennung. (Im Innenkegel einer Bunsenflamme findet eine langsame Verbrennung statt (1).) Die Wärme wird dann durch Leitung auf die benachbarten Schichten übertragen mit einer Fortpflanzungsgeschwindigkeit, die nur wenige m/sec beträgt. Da aber die Verbrennung mit einer starken Drucksteigerung verbunden ist, bedingt durch die Wärmeausdehnung, so wird gleichzeitig die jeweils benachbarte, noch unverbrannte Schicht komprimiert. Durch diese adiabatische Kompression wird nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik die Temperatur des entzündlichen Luftgemisches beträchtlich gesteigert. Dadurch wächst die Reaktionsgeschwindigkeit und die Entflammung erfolgt rascher. Dies bedingt aber wiederum, daß die nächsten Schichten noch stärker komprimiert werden. Vorausgesetzt, daß es sich um ein Gemisch handelt, das einer hinreichend raschen Verbrennung fähig ist, muß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Entflammung fortwährend ansteigen. Die Kompression in den noch unverbrannten Schichten kann eine solche Größe erreichen, daß Selbstentzündung erfolgt. Die nunmehr erzeugte starke Kompressionswelle wird sich unter gleichzeitiger Entflammung mit sehr großer Geschwindigkeit fortpflanzen. Das ist die spontane Entwicklung der Explosionswelle (2). Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Explosionswelle ist nach Berthelot (3) eine für jede Mischung charakteristische physikalische Konstante. Nach gut übereinstimmenden Untersuchungen von Berthelot und Dixon (4) erreicht die Geschwindigkeit von Explosionswellen explosibler Gasgemische

Geschwindigkeiten bis über 2800 m/sec, das ist das ca. 8fache der Schallgeschwindigkeit.

Der Maximaldruck der Explosionswelle erreicht sehr hohe Werte: 30 bis 40 at in Sauerstoff-Wasserstoffgemischen. Da außerdem durch die mit der Explosion verbundene Wärmeentwicklung eine Temperatursteigerung von 2—3000° stattfindet — für Ruß-Sauerstoffgemische läßt sich die Explosionstemperatur zu etwa 4500° berechnen (5) —, so hat man es mit Drucken zu tun, die 100 at erheblich übersteigen können (2). Nicht nur die Größe dieses Druckes, sondern auch der Umstand, daß er so plötzlich auftritt, bedingt die so gewaltigen, zerstörenden Kräfte der Explosionswelle.

Hervorgehoben sei aus Vorstehendem, daß der Druck der Explosionswelle, genauer die durch ihn erzeugte Wärmemenge, vollauf ausreichend ist, ein explosibles Gas- oder Staubluftgemisch ohne Hinzutritt fremder Energie zu entzünden.

Man hat beobachtet, daß Explosionswellen eine kräftige Saugwirkung (6) eigen ist, welche von außen her Luft (Staubluft) gleichsam in ihren Strudel hineinreißt. Wie erklärt sich diese eigenartige Erscheinung? Folgen wir dem Lauf der Explosionswelle, so kommen wir bald in eine neutrale Zone, darauf in eine, in welcher weniger als Atmosphärendruck herrscht. Wahrscheinlich ist dies so zu erklären, daß die Explosionsgase durch Abkühlung sich zusammenziehen.

Es ist hier der Ort, auf einen wesentlichen Unterschied zwischen der Staub- und der Gasexplosion hinzuweisen, einen Unterschied, welcher die Wirkung der Staubexplosion ungleich viel heftiger erscheinen läßt als die der Gasexplosion. Stellen wir uns je ein explosibles Gasluft- und Staubluftgemisch vor:

1. eine stöchiometrische Mischung von Wasserstoff- und Sauerstoffgas (Knallgas)

$$2\,H_2 + O_2 = 2\,H_2O,$$

2. eine ebensolche Mischung von Kohlenstoff (Ruß) und Sauerstoff

$$C + O_2 = CO_2.$$

Das explosible Gemisch 1 nimmt bei 0°, da es aus 3 Mol Gas besteht, den Raum von $3 \cdot 22{,}4\,\ell = 67{,}2\,\ell$ ein. Bringt man das Gemisch zur Explosion und kühlt dann wieder auf 1° ab, so erhält man 36 g, entsprechend ca. 36 cm^3 festes oder flüssiges Wasser. Das vor der Explosion vorhanden gewesene Stoffvolumen ist sonach auf den 1870sten Teil zusammengeschrumpft. Das Endergebnis dieser Explosion ist also eine Volum-, mithin auch Druckverringerung. Der tatsächlich zu beobachtende Explosions-

druck ist einzig und allein der Ausdehnung durch die gewaltige Reaktionswärme zuzuschreiben.

Das explosible Gemisch 2 nimmt bei 0°, wenn wir das Volumen des festen Kohlenstoffs vernachlässigen, was wir unbedenklich tun können, den Raum von 1 Mol = 22,4 ℓ ein. Nach der Explosion haben wir 1 Mol Kohlensäuregas, welches, wie bei 1 auf 0° gebracht, wiederum den Raum von 22,4 ℓ, das ist das Ausgangsvolumen, einnimmt. Diese Staubexplosion ist also von keiner Volumkontraktion begleitet. (Metallstaubexplosionen hingegen bedingen letzten Endes eine Volumkontraktion, da das Metall keine gasförmigen Oxyde wie der Kohlenstoff bildet.)

Wenn man außerdem in Erwägung zieht, daß die molare Verbrennungswärme des Kohlenstoffs um 40 % größer ist als die des Wasserstoffs (1 Mol C entwickelt bei der Verbrennung zu CO_2 94400 cal.; 1 Mol H_2 bei der Verbrennung zu H_2O flüssig 68400 cal.), dann wird ohne weiteres die größere Heftigkeit der Staubexplosion klar.

Literatur.

1) Haber: Techn. Gasreaktion; S. 282.
2) Nernst: Theoret. Chemie, 6. Aufl., S. 684.
3) Berthelot: Compt. rend. 93 (1881), S. 18.
4) Dixon: Ber. Dtsch. Chem. Ges. 38 (1905), S. 2419.
5) Trautz: Lehrbuch d. Chemie, Bd. III (1924), S. 726.
6) Trautz: Ebenda, S. 732.

IV. Die gefährlichen Eigenschaften des Staubes.

Zunächst ist es wesentlich, daß der Stoff, aus dem der Staub besteht, brennbar ist. Aber die Brennbarbeit des Stoffes allein genügt noch nicht. Dafür ein Beispiel (1): Ein Stück Würfelzucker — Gewicht ca. 6 g — kann man, wenn man den geschmolzenen Zucker am Abtropfen verhindert (z. B. durch Betupfen mit etwas Zigarrenasche oder durch Einwickeln in ein Drahtnetz), mittels einer Zündholzflamme sehr wohl zum Brennen bringen, aber nicht zur Explosion. Zerkleinert man das Zuckerstück zu feinstem Staub und macht ein kleines Häufchen davon, so kann man den Staub mit einer Flamme auch noch nicht zur Explosion bringen. Suspendiert man aber die 6 g Zuckerpulver in 10 ℓ Luft, stellt man also das Aerosol her, so bekommt man ein äußerst explosibles System. Mit einer Zündholz-

flamme oder mit einem Stück dunkelrotglühendem Eisen kann man das Staubluftgemisch zur Explosion bringen. Suspendiert man aber statt der 6 g Zuckerstaub nur 6 mg in den 10 ℓ Luft, so gelingt es mit der heißesten Flamme nicht, das Staubluftgemisch zur Explosion zu bringen, obwohl die Staubwolke, deren Konzentration 0,6 g/m³ beträgt, so dicht erscheint wie dicker Nebel, in dem man nur wenige Meter weit sehen kann.

Dieses Schulbeispiel zeigt, daß zur Ermöglichung einer Staubexplosion es nicht nur erforderlich ist, daß der Staub an sich brennbar ist und einen gewissen Feinheitsgrad hat, sondern daß die Staubteilchen auch einen bestimmten mittleren Abstand haben müssen, und zwar darf dieser Abstand weder zu groß noch zu klein sein.

Der Einfluß der Teilchengröße und des Teilchenabstandes ist schon in den ältesten Arbeiten über Staubexplosionen richtig erkannt worden. R. Weber (2) wie H. Stockmeier (3) weisen bereits in ihren als klassisch zu bezeichnenden, preisgekrönten Experimentalarbeiten darauf hin. Weber bezeichnet die leicht verstäubbaren Mehlarten als die gefährlichsten, und Stockmeier schreibt: „Nach meinen Versuchen liegt die Entzündungstemperatur von käuflichem, gröberem Aluminiumbronzepulver bei 480 bis 490°, von Aluminiumschliff bei 230°.“ Auch Weinmann (4) kommt anläßlich seiner Versuche mit Zucker in der bergfiskalischen Versuchsstrecke zu Neunkirchen (Saar) zu dem Ergebnis, daß der Staub um so leichter zur Explosion gebracht werden kann, je feiner er ist. Auch bei Stein- und Braunkohlenstaub hat er die gleichen Beobachtungen gemacht. Die Abhängigkeit der Gefährlichkeit eines Staubes von seiner Feinheit, seiner Teilchengröße, ist leicht zu erkennen. Ein kleines Teilchen ist leichter zu vergasen und zu entzünden als ein großes. Kleine Teilchen sind, da von geringerem Gewicht, leichter aufzuwirbeln als große. Und kleine Teilchen können sich auch länger in der Schwebe halten als große (Verhältnis: Querschnitt zu Volumen). Auch haben kleine Teilchen relativ mehr Luft bzw. Sauerstoff an ihrer Oberfläche verdichtet als große (Verhältnis: Oberfläche zu Volumen).

Zwischen Teilchengröße und Gefährlichkeit besteht nach vorstehendem ein einfacher Zusammenhang: etwa umgekehrte Proportionalität. Für den Teilchenabstand liegen die Verhältnisse etwas verwickelter. Die Erfahrung lehrt, daß bei äußerst kleinem Teilchenabstand — bei höchster Staubkonzentration — noch keine Explosionsgefahr besteht. Mit dem Größerwerden des Abstandes wird ein Punkt erreicht, bei dem Entflammung bzw. Explosion eintritt. Das ist die obere Explosionsgrenze. Wird der Teilchenabstand größer und größer, so wird schließlich ein Schwellenwert erreicht, bei dessen Überschreitung keine Explosion mehr ausgelöst

werden kann. Das ist die untere Explosionsgrenze. Nur innerhalb dieser beiden Grenzen ist stets eine Explosion möglich. Diese beiden Explosionsgrenzen sind aber keine scharfen Trennungslinien, es sind verschwommene Grenzen.

Versuchen wir uns ein Bild davon zu machen, wie die Lagerung der Staubteilchen im Raum, wie groß ihr mittlerer Teilchenabstand bei den Explosionsgrenzen ist. Um gleichzeitig zu veranschaulichen, daß große Teilchen weniger gefährlich sind als kleine, wollen wir bei gleicher Konzentration — ausgedrückt in Gramm Staub/m³ — sowohl würfelförmige Teilchen von 1 mm wie auch von 1 μ Kantenlänge betrachten. Der Einfachheit halber nehmen wir an, der Staub habe das spezifische Gewicht $s = 1$, die untere Explosionsgrenze liege bei der Staubkonzentration 27 g/m³ und die obere Explosionsgrenze bei 8000 g/m³. (Das sind Zahlenwerte, die annähernd der Erfahrung entsprechen.)

Tabelle I.

Teilchenabstand und Explosionsgrenzen.

	A. Untere Explosionsgrenze 27 g/m³		B. Obere Explosionsgrenze 8000 g/m³	
Teilchenlänge	1 mm	1 µ	1 mm	1 µ
Teilchengewicht	10^{-3} g	10^{-12} g	10^{-3} g	10^{-12} g
Teilchen/m³	$27 \cdot 10^3$	$27 \cdot 10^{12}$	$8 \cdot 10^6$	$8 \cdot 10^{15}$
Teilchen/m	30	$3 \cdot 10^4$	200	$2 \cdot 10^5$
Teilchenabstand	ca. 34,5 mm	ca. 34,5 µ	ca. 5 mm	ca. 5 µ
oder	ca. 34,5 Teilchenlängen		ca. 5 Teilchenlängen	

Tabelle I zeigt, daß bei gleichen Staubkonzentrationen die Teilchenzahl den 10^9fachen Betrag erreicht, wenn der Teilchendurchmesser sich auf $^1/_{1000}$ verringert. Allgemein ausgedrückt: einer Verkleinerung der Teilchen auf $1/n$ ihrer ursprünglichen Länge entspricht ein Anwachsen der Teilchenzahl auf das n^3fache: Die Gefahr wächst in der dritten Potenz.

Wir erkennen weiter, daß bei gleicher Staubkonzentration der Teilchenabstand der Teilchenlänge proportional ist. Je kleiner die Teilchen, um so kleiner ihr mittlerer Abstand und um so größer die Wahrscheinlichkeit, daß die Flamme eines entzündeten Teilchens die unmittelbar benachbarten Teilchen erreicht, diese auch zur Entzündung bringt usw.

Auf die Ähnlichkeit der Staubexplosionen mit den Gasexplosionen ist bereits hingewiesen worden. Aus den Untersuchungen, besonders der Karlsruher Schule, über die Explosionsgrenzen von Gasluftgemischen wissen wir, daß die Lage der Explosionsgrenze abhängig ist von der Form

des Raumes, in dem die Explosion erzeugt wird. In kugelförmigen Gefäßen wird beispielsweise eine andere Explosionsgrenze ermittelt als in langen, zylindrischen.

Für Wasserstoffluftmischungen hat Eitner (5) festgestellt, daß bei Verwendung eines kugeligen Gefäßes von 1 ℓ Inhalt die untere Explosionsgrenze bei 8,7 % H_2 und die obere Explosionsgrenze bei 75,5 % H_2 liegt, während in der zylindrischen Bunte-Bürette von 110 cm^3 Inhalt die entsprechenden Werte zu 9,45 % und 66,4 % ermittelt wurden. Danach rücken bei Verwendung enger, kleiner Gefäße die Grenzen zusammen; das gefährliche Intervall erscheint kleiner.

In den Versuchsstrecken der Kohlenbergwerke wurden Ergebnisse erzielt, die entgegengesetzt erscheinen (6). Mit steigendem Querschnitt der Versuchsstrecken mußten größere Mengen Sprengstoff aufgewendet werden, um explosible Gas- oder Staubluftgemische zu zünden. So wurden in England in Übereinstimmung mit Versuchen, die in der Gelsenkirchener Versuchstrecke durchgeführt wurden, folgende Vergleichszahlen ermittelt:

Querschnitt der Versuchsstrecke	0,456; 1,65; 1,91 m^2
Höhe der Grenzladung	150; 350; 500 g.

Aus diesen Tatsachen erklärt es sich auch, daß die Angaben über die Explosionsgrenzen von Staubluftgemischen oft beträchtlich voneinander abweichen. Die Unsicherheit der Ermittlung der Explosionsgrenzen für Stäube wird noch erhöht durch die experimentelle Schwierigkeit, wohl definierte, homogene Staubluftgemische herzustellen.

Wir wollen im folgenden zeigen, wie die verschiedenen Experimentatoren versucht haben, die Gefährlichkeit des Staubes zu zeigen und die Explosionsgrenzen, in der Regel im Verein mit der Entzündungstemperatur oder der Entflammbarkeit des Staubes, zu ermitteln.

Vital (7), wohl einer der ersten, der vergleichende Versuche über die Gefährlichkeit verschiedener Staub-, besonders Kohlenstaubarten, angestellt hat, blies eine Staubwolke durch eine Gasflamme in ein langes Glasrohr, an dessen entferntem Ende eine Holundermarkkugel lag. Aus der Art und Länge der Explosionsflamme und aus der Strecke, welche die Holundermarkkugel durch den Explosionsdruck geschleudert wurde, zog er seine Schlüsse auf die relative Gefährlichkeit des Staubes.

R. Weber (8) hat einige Jahre später eine sehr gründliche Arbeit über Mehlstaubexplosionen veröffentlicht. Er hat zur Herstellung des erforderlichen Mehlstaubstromes von möglichst gleichförmiger und feststellbarer Dichtigkeit die kleine mechanische Siebvorrichtung der Fig. 2 benutzt. „Dieselbe besteht aus einem Blechzylinder *a* von 100 mm Durchmesser

und 15 mm Höhe, in welchem Drahtsiebe von verschiedener Feinheit des Gewebes vermittels eines Spannringes dicht befestigt werden können. Ein in diesen Zylinder eingefügter Pappring *b* soll das Herausschleudern des Mehles verhindern. Der Blechzylinder ist an einem 200 mm langen, etwas steifen Stück Bandeisen *c* befestigt, welches an seinem anderen Ende auf einem Holzgestelle angeschraubt ist und in der Nähe des Siebes die Spitze einer Schraube *d* berührt, sobald die gehobene Feder zurückschnellt. Das Heben der Feder erfolgt durch ein Stiftrad, welches unter ein am Siebe befestigtes Blechstück greift. — Bei ungeänderter Stellung der Schraube *d* sowie bei gleicher Entfernung des Stiftrades vom Siebe hängt die Wirksamkeit des Apparates von der Umdrehungsgeschwindigkeit des Stiftrades ab, und um darin eine möglichste Gleichförmigkeit und Regelmäßigkeit zu er-

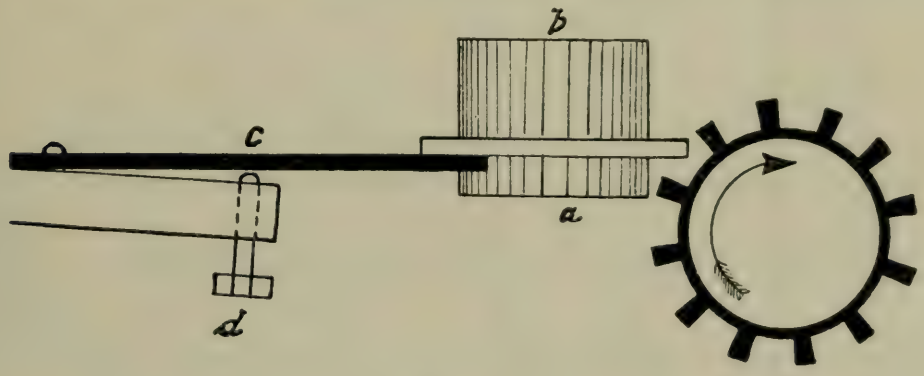


Fig. 2.
Vorrichtung zur Bestimmung der unteren Explosionsgrenze nach Weber.

reichen, wurde die Zahl der Umgänge nach den Schlägen eines einfachen Pendels normiert."

„Um den Dichtigkeitsgrad des aus verschiedenen Mehlgattungen gebildeten, entzündlichen Mehlstaubes zu ermitteln, wurden Staubströme von verschiedener Dichtigkeit durch Variation der Umdrehungsgeschwindigkeit des Stiftrades sowie der Hubhöhe des Siebes, ferner durch Einschaltung verschieden feiner Siebe erzeugt, und es wurde deren Dichtigkeit soweit abgemindert, daß die Ströme sich noch eben in ihrer ganzen Ausdehnung entflammen ließen. Aus diesen (aus dem Siebe hervorgehenden) zylindrischen Staubströmen wurden nun durch Einschieben eines Rahmens vertikale Zylinder von gleicher Länge gleichsam herausgeschnitten, deren Mehlgehalt die Quantität des in einem bestimmten Volumen enthaltenen Mehles repräsentiert. Der zur Aufnahme dieses Mehles dienende Rahmen besteht aus zwei von einem leichten Holzgestelle getragenen Pappscheiben, deren untere mit einem Stück Glanzpapier belegt ist. Die Papptafeln sind 150 mm

voneinander entfernt, wonach die Höhe des Mehlstaubzylinders dieser Entfernung, sein Durchmesser dem des Siebes gleichzusetzen ist, welcher 95 mm beträgt. Der Inhalt des Staubzylinders ist 1,05 ℓ.

Bei der Ausführung der Versuche wurde zunächst ein auf der Grenze der Entzündlichkeit stehender Mehlstaubstrom erzeugt. In diesen wurde der Rahmen eingeschoben, eine zum Absetzen des Mehles genügende Zeit darin gelassen, sodann rasch zurückgezogen und die Menge des auf dem Glanzpapier abgesetzten Mehles vermittels einer feinen chemischen Wage bestimmt, nachdem die Operation des Einschiebens 20mal wiederholt worden."

„Die ermittelten Zahlenwerte gehen aus Tabelle II hervor, deren letzte Kolumne diejenige Menge des Mehles nachweist, welche in 1 ℓ = 1000 cm³ entzündbaren Mehlstaubes enthalten sind.

Tabelle II.

Die untere Explosionsgrenze von Mehlen nach Weber.

Mehlart	Wassergehalt	Menge des auf dem Pappschirme abgesetzten Mehles bei 20maligem Einschieben				Menge des in 1 ℓ entzündbaren Staubes enthaltenen Mehles
	%	g	g	g	g	mg
Weizen	11,0	0,490	0,508	0,477	0,437	23
Roggen Nr. 0 . .	11,2	0,577	0,547	0,572	0,502	27
„ „ 1 . .	11,0	0,363	0,337	0,457	0,484	20
„ „ 2 . .	11,0	0,520	0,347	0,617	0,482	25
Buchweizen . . .	10,1	0,410	0,332	0,459	0,392	18
Erbsen	9,4	0,767	0,799	0,787	0,682	35
Gerste	9,1	0,709	0,680	0,662	0,582	33
Malz	9,8	0,409	0,382	0,459	0,419	20
Reis	10,0	0,512	0,532	0,572	0,483	25
Kartoffelstärke .	10,5	0,415	0,357	0,345	0,392	21
Kleienmehl . . .	9,0	0,479	0,617	0,654	0,559	25
Holzmehl	6,2	0,547	0,457	0,508	0,437	25

Die äußere Beschaffenheit eines solchen entzündbaren Mehlstaubes betreffend, so stellt sich derselbe als eine ziemlich dichte, weiße Staubwolke dar, welche dahinter befindliche Gegenstände stark verschleiert. Es dürfte interessant und lehrreich für manche sein, sich durch Anschauung ein besseres Bild von dem Aussehen einer derartigen entzündlichen Staubwolke zu verschaffen, als dies durch eine Beschreibung zu ermöglichen ist."

Weber betont, daß er sich sehr wohl bewußt ist, daß seine Versuche mit mancherlei Beobachtungsfehlern behaftet sind. Wir müssen aber heute bewundernd anerkennen, mit welcher erstaunlichen Einfachheit und

Exaktheit Weber vor nahezu 50 Jahren seine Messungen durchgeführt hat. Seine Bestimmungen der unteren Explosionsgrenze der verschiedenen Mehlarten dürften auch heute noch nicht durch präzisere ersetzt sein.

H. Stockmeier (3), welcher sich ausschließlich mit Explosionen in Aluminiumbronzefabriken beschäftigt hat, hat sich zur Vorführung von Aluminiumstaubexplosionen, die sich nach seiner Ansicht vollkommen an die bekannten Kohlenstaubexplosionen in den Bergwerken und die Mehlstaubexplosionen in den Mühlen anschließen, eines Apparats bedient, der dem Weberschen nachgebildet war. Da dieser Apparat indes nur die Entzündung des fein verteilten Aluminiums, nicht aber den Vorgang der Explosion zu zeigen gestattet, hat Stockmeier noch folgenden Apparat konstruiert:

Auf einem Gestell ist eine mit 2 Tuben versehene, dünnwandige Glaskugel von 2 ℓ Inhalt beweglich angeordnet. Diese enthält z. B. 30 g entfetteten Aluminiumschliff. Durch die beiden Tuben sind mit Hilfe durchbohrter Korke Kupferstifte eingeführt, welche mit den Polen eines Funkeninduktors verbunden sind. Mittels eines kleinen Elektromotors wird die Kugel zur Zerstäubung des Aluminiumschliffes in Rotation versetzt. Beim Durchschlagen des 4—5 cm langen Funkens des Induktors explodierte das Aluminiumstaubluftgemisch unter Zertrümmerung der Glaskugel.

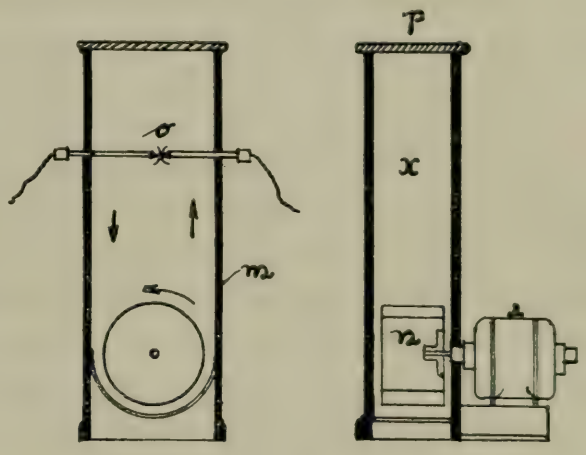


Fig. 3.
Vorrichtung zur Bestimmung der unteren Explosionsgrenze nach Bauer.

Explosionsgrenzen hat Stockmeier mit Hilfe seines Apparats nicht bestimmt. In einem Experimentalvortrag gibt Stockmeier an, daß nach seinen Versuchen die Entzündungstemperatur von käuflichem, gröberem Aluminiumbronzepulver bei 480—490°, von Aluminiumschliff bei 230° liegt. Wie er diese Versuche angestellt hat, ist aus den Angaben nicht ersichtlich. Zur Ermittlung der unteren Explosionsgrenze für Aluminiumstaub hat sich R. Bauer (9) des obigen Apparats (Fig. 3) bedient. Er besteht „aus einem senkrecht stehenden Behälter *m*, einem durch einen Elektromotor betriebenen Flügelwerk *n*, dem Fernzünder *o* und einem lose aufliegenden Deckel *p*. Nach Aufgabe einer kleinen bestimmten Menge Aluminiumstaub wurde der Motor in Betrieb gesetzt und darauf mit kurzen

Unterbrechungen der Fernzünder getätigt. — Diese Versuche wurden mit steter Vergrößerung der Aluminiumstaubmengen solange fortgesetzt, bis sich bei einem Mischungsverhältnis von 0,0416 kg Luft zu 0,01387 kg Aluminiumstaub die erste Explosion ergab. Öfters wiederholte Versuche brachten stets dasselbe Ergebnis hervor.“ Durch Umrechnung der Bauerschen Zahlen auf g/m³ erhält man für Aluminiumstaub die untere Explosionsgrenze bei einer Staubkonzentration von etwa 400 g/m³.

Mit einem Apparat nach Bauer hat Weinmann (4) festgestellt, daß die untere Explosionsgrenze für Zuckerstaub bei einer Konzentration von weniger als 72 g/m³ liegt und die obere Explosionsgrenze noch über 4,5 kg/m³. Für verschiedene Saarkohlen hat Weinmann auf gleiche Weise die untere Explosionsgrenze ermittelt, und zwar zu 258 bis 344 g/m³ für am Versuchstag in der Grube frisch erhauene Kohle und zu 172 bis 215 g/m³ für 20 Tage bei 22° C gelagerte Kohle.

Nach den eigenen experimentellen Erfahrungen, die Verfasser mit einem dem Bauerschen nachgebildeten Apparat gemacht hat, dürften diese Werte mit Vorsicht aufzunehmen sein. Sie sind sicher eher zu hoch als zu niedrig. In der Regel wird die aufgegebene, gewogene Staubmenge nicht restlos aufgewirbelt. Auch hat die durch das Aufwirbeln mittels des Flügelrades erzeugte Staubwolke Zonen verschiedener Dichte, wie sie Wirbeln eigen sind. Die Staubwolke ist nicht homogen. Ob Zündung oder Explosion eintritt, hängt davon ab, mit welcher Geschwindigkeit der Staub an der Zündvorrichtung vorbei bewegt wird und von welcher Dichte der Teil des Staubwirbels ist, der die Zündvorrichtung trifft.

Der Vollständigkeit halber seien hier noch erwähnt die Arbeiten von Galloway (10), Mallard und M. Le Chatelier (11), Hilt (12), Engler (13), Faraday (14), R. Holtzwart und E. v. Meyer (15), Watson Smith (16) und S. F. Peckham (17). Diese Arbeiten beschränken sich im wesentlichen darauf, zu zeigen, ob ein Staub entflammbar ist oder nicht. Englers Arbeit (13) allerdings enthält einen neuen Gesichtspunkt. Er zeigt, daß Suspensionen von Ruß oder Holzkohlenstaub in Luft nicht zur Entflammung oder Explosion gebracht werden können unter Bedingungen, unter denen Mischungen von Luft mit Mehl, Schwefel-, Naphthalin- oder Kolophoniumpulver explosionsartig verbrennen. Wurde aber der Ruß oder das Holzkohlenpulver in Leuchtgas-Luftgemischen suspendiert, die für sich allein nicht mehr explosibel waren, so trat dennoch Explosion ein. So konnte Engler eine rasche Entzündung durch die ganze Masse hervorrufen, wenn er Holzkohlenpulver im einer Leuchtgas-Luftmischung suspendierte, die nur 3,5 Vol.-% Leuchtgas enthielt, während dasselbe Leuchtgas zu 7,5 Vol.-% mit Luft gemischt bereits nicht mehr zündete. Desgleichen

zeigte ein Gemisch von 2,5 Vol.-% Methan mit Luft und Holzkohlenstaub Zündung durch die ganze Masse, während eine Luftmischung mit 3 bis 4 Vol.-% Methan allein gar keine und erst mit 5,5—6 Vol.-% schwache Explosionserscheinungen zeigte. Durch Zumischung von brennbarem Staub zu einem für sich allein nicht mehr entflammbaren Gemisch von Luft mit einem brennbaren Gas kann dieses explosiv werden. Dies ist das bemerkenswerte Ergebnis der Englerschen Versuche, die 1883 auf Veranlassung der Badischen Regierung durchgeführt wurden, um Aufklärung zu schaffen über die wiederholten Explosionen in den Rußfabriken des badischen Schwarzwaldes.

Die Untersuchungen von Rudolf Holtzwart und Ernst v. Meyer (15) beschränken sich auf Sächsischen und Niederlausitzer Braunkohlenstaub. Sie zeigten, daß die Explosionen in den Brikettfabriken nicht auf das Freiwerden von brennbaren Gasen bei der Verarbeitung von Braunkohle zurückzuführen sind — selbst beim Schwelen der Kohle bei etwas über 400° erhielten sie keine explosiblen Gasgemische —, sondern daß der Staub als solcher die Ursache ist. Es gelang ihnen verschiedene, meist aschenarme Braunkohlenstäube in feinster Zerteilung in Luft mittels eines Induktionsfunkens zur Explosion zu bringen. Ihre Ausführungen gipfeln in den Sätzen: „Das Agens, welches die Hauptgefahr, ja zunächst die einzige Gefahr mit sich bringt, ist der feine, in Bewegung versetzte und dadurch aufs äußerste zerteilte Staub. Aber nur dann wird die Gefahr, welche er in sich birgt, akut, wenn er Gelegenheit findet sich zu entzünden ... Ohne vorausgehenden „Brand" keine Explosion!"

Taffanel und Dürr (18) (Versuchsstrecke Liévin) bedienten sich zur Bestimmung der relativen Explosionsgefährlichkeit einiger Staubarten einer photographischen Methode. Sie bliesen mittels eines Sauerstoffstromes eine gewogene Menge Staub über und gegen eine genau definierte Benzinflamme und maßen dann auf photographischem Wege Länge und Größe der Explosionsflamme. — In der Hauptsache arbeiteten sie mit Kohlenstaub und nur zu Vergleichszwecken mit Zucker-, Mehl- und Lykopodiumstaub.

R. V. Wheeler (19) (Versuchsstrecke Eskmeals) hat sowohl die relativen wie auch die niedrigsten Entzündungstemperaturen einer großen Zahl organischer Staubarten, wie sie in Fabrik- und Werkstattbetrieben anfallen, bestimmt. Der Anlaß zu diesen Untersuchungen waren zwei folgenschwere Explosionen, die sich in England 1911 ereignet hatten. Zur Bestimmung seiner relativen Entzündungstemperaturen bediente er sich der folgenden Vorrichtung (Fig. 4), die im Prinzip der von Holtzwart und v. Meyer verwendeten gleicht.

„Ein an beiden Enden offener Glaszylinder von 8 cm Durchmesser und 140 cm Länge ist wagrecht gelagert. Ein Platindraht, der in 32 Windungen dicht um eine dünnwandige Quarzkapillare gewickelt ist, geht 40 cm von dem einen Ende entfernt wagrecht mitten durch den Zylinder. Durch die Quarzröhre ist ein Platin-Platin = Rhodiumthermoelement geführt, das mit einem Millivoltmeter verbunden ist, das so kalibriert ist, daß man die Temperaturen an der 100teiligen Skala ablesen kann. Geeignete Schaltungen gestatten einen elektrischen Strom durch die Platinspirale zu leiten, so daß diese auf jede Temperatur bis zu etwa

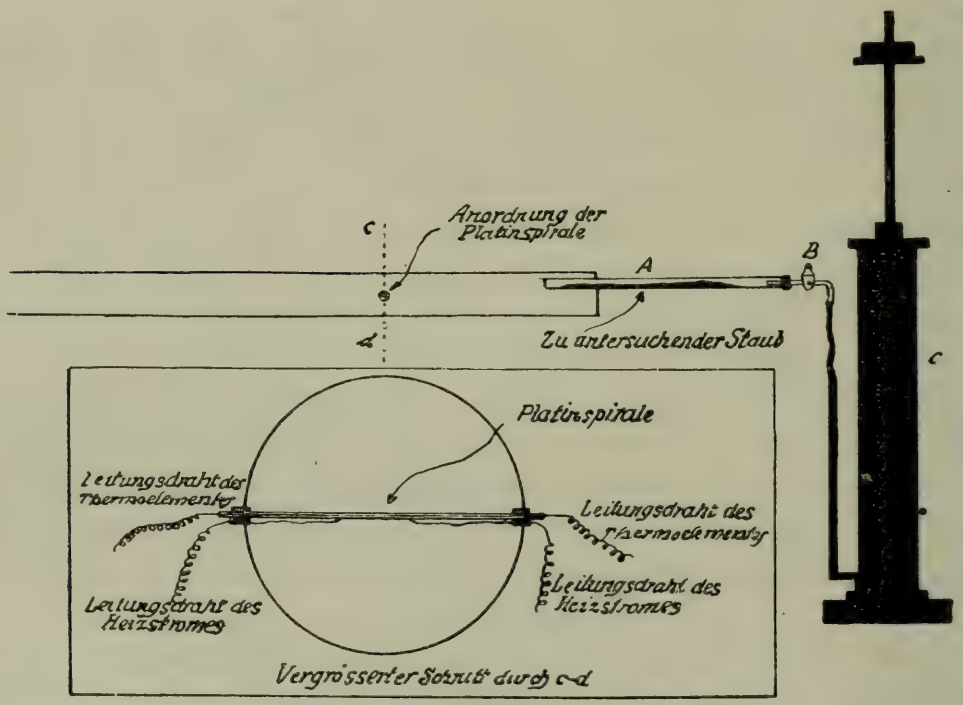


Fig. 4.
Vorrichtung zur Bestimmung der relativen Entzündungstemperatur nach Wheeler.

1400° C erhitzt werden kann. Ein Vorschaltwiderstand gestattet, die Spirale auf konstanter Temperatur zu halten. Die Länge der erhitzten Spirale ist 17 mm, ihr Durchmesser 1,5 mm.

Der zu untersuchende Staub wird in einer Glasröhre von 2,5 cm lichter Weite und 45 cm Länge gleichmäßig verteilt. Diese Röhre *A* ist an dem einen Ende durch einen Gummistopfen verschlossen, in dessen Bohrung sich ein Glashahn *B* mit 1 cm Durchgangsweite befindet. Ihre Lage zeigt die Figur. Das offene Ende des Rohres ist 30 cm von der erhitzten Platinspirale entfernt. Der Hahn ist mit einer Vorrichtung *C* zur Erzielung eines konstanten Luftstoßes verbunden; sie besteht aus einem 50 cm langen

Messingzylinder von 11 cm lichter Weite, der mit einem Kolben versehen ist, so daß ein Druck von 2 Pfund/Quadratzoll erzeugt werden kann. Nachdem die Platinspirale auf die Temperatur erhitzt worden ist, die durch Vorversuche als die ungefähr erforderliche bestimmt worden ist, wird die Staubwolke durch plötzliches Öffnen des Hahnes *C* erzeugt. Der Luftstoß, welcher über die Oberfläche des Staubes in der Röhre *A* geht, wirbelt die oberste Staublage auf und treibt sie in das weitere Rohr und über die erhitzte Spirale in einer Wolke, welche während des Kolbenstoßes gleichförmig bleibt. Wenn eine Entzündung erfolgt, wird die Temperatur der Platinspirale um 10 oder 20° C erniedrigt und ein neuer Versuch angestellt, und zwar so oft, bis zwei um 10° C differierende Temperaturen gefunden sind, bei deren einer eine Entzündung eintritt, während bei der anderen die Staubwolke, ohne zu entflammen, die Spirale passiert. Das Mittel der beiden Temperaturen wird dann als die Entzündungstemperatur des Staubes unter den Versuchsbedingungen angesprochen.

Als ein den Vorgang deutlich veranschaulichendes Beispiel seien die einzelnen Versuche mit Zucker wiedergegeben.

Entzündungstemperatur des Zuckerstaubes. — Der Staub wurde getrocknet und durch ein Sieb von 200 Maschen auf den Längenzoll gesiebt.

Temperatur der Spirale:	Ergebnis:
900° C	Zündung. Rasche Ausbreitung der Flamme.
880° C	„ „ „ „ „
860° C	„ „ „ „ „
840° C	Zündung nach einiger Zeit.
820° C	„ „ „ „
800° C	Keine Zündung.
810° C	Zündung. Rasche Ausbreitung der Flamme.
800° C	Keine Zündung.

Entzündungstemperatur = 805° C.

Wenn die Zündung erfolgt, pflanzt sich die Flamme sowohl mit als gegen den Staubstrom fort. Mitunter kommt es vor, daß die Flamme zum offenen Ende des Zylinders bis auf eine Entfernung von 100 cm von der Zündspirale hinausschlägt. Bei anderen Stäuben wandert die Flamme nur 50—60 cm durch den Zylinder; wieder bei anderen, meist solchen mit hohem Aschengehalt, erscheint nur in der Nähe der Zündspirale ein kleines, flackerndes Aufleuchten und eine eigentliche Ausbreitung der Flamme findet nicht statt.“

Tabelle III. Relative und niedrigste Entzündungstemperatur von 66 Staubarten nach Wheeler.

1	2	3	4	5	6	7
Tgb.-Nr.	Stoff	Vom Stoff gingen durch das 200-Maschensieb %	Relative Entzündungstemperatur ° C	Bemerkungen	Niedrigste Entzündungstemperatur ° C	Unbrennbare Substanz %
1	Röst-Dextrin	praktisch alles	940	sehr rasche Fortpflanzung der Flamme	540	4,2
2	Kork	praktisch alles	975	rasche Fortpflanzung	620	0,6
3	Holzmehl	flockig, nicht siebbar	985	obgleich ungesiebt, leichte Wolkenbildung	610	3,2
4	Lampenschwarz	nicht siebbar	—	keine Zündung	keine Zündung	—
5	Baumwollsamen	flockig, nicht siebbar	—	schwierige Wolkenbildung; nur die Spirale treffende Teilchen neigen zur Entflammung	Wolkenbildung unmöglich	7,4
6	Baumwollsamen und Sojabohne				Wolkenbildung unmöglich	60,5
7	Baumwollsamen				Wolkenbildung unmöglich	26,3
8	Mischkuchen	10	955	rasche Fortpflanzung	620	9,3
9	Reismehl und Zuckerkehricht	flockig, nicht siebbar	970	leichte Wolkenbildung	630	8,1
10	Rapssamen	nicht zu sieben, Probe zu klein	1050	Entzündungstemperatur wahrscheinlich niedriger, Mangel an Staub	650	Nicht bestimmt
11	Nicht extrahierte Sojabohne	10	975	—	630	12,5
12	Russ. Raps	90	—	keine Zündung	nur einige Funken oberhalb 640°	72,8
13	Extrahierte Sojabohne	50	1140	—	630	12,5
14	Rizinusölrückstände	50	1100	—	655	23,1
15	Korn (Mühle)	50	995	—	630	18,2
16	Tabak	75	—	keine Zündung, nur wenige Funken bei 1100° an der Spirale	680, sehr kleine Flamme	21,0
17	Organic Ammonia (Hirschhornsalz?)	10			690, sehr kleine Flamme	12,5
18	Retortenkohle	30	—	keine Zündung	keine Zündung	4,4

Tabelle III. Relative und niedrigste Entzündungstemperatur von 66 Staubarten nach Wheeler (Fortsetzung).

1	2	3	4	5	6	7
Tgb.-Nr.	Stoff	Vom Stoff gingen durch das 200-Maschensieb %	Relative Entzündungstemperatur ° C	Bemerkungen	Niedrigste Entzündungstemperatur ° C	Unbrennbare Substanz %
19	Gewürz	50		Flackern an der Spirale bei 1000° und mehr, aber keine Ausbreitung der Flamme	680, sehrkleine Flamme	29,9
20	Gemahl. Drogen	30			690, sehr kleine Flamme	8,8
21	Gemahl. Drogen	75	—		680, sehr kleine Flamme	58,7
22	Gemahl. Drogen	70			690, sehr kleine Flamme	21,3
23	Tabak	75			700, sehr kleine Flamme	31,6
24	Leder	30	1050	—	740	14,3
25	Sägemehl	20	970	—	635	3,9
26	Mühlenstaub	30	—	geringes Aufflackern an der Spirale, keine Ausbreitung der Flamme	600	7,8
27	Ölkuchen	30	945	—	660	27,3
28	Staub von Sackreinigung	flockig, nicht siebbar	—	keine Zündung	keine Zündung	74,6
29	Reismühle	20	—	schwaches Aufflackern an der Spirale, keine Ausbreitung der Flamme	630	4,2
30	Kokosnußölmühle	nicht gesiebt			640	5,8
31	Kleieabfall	75	980	—	640	30,0
32	Tee	50	1010	—	640	8,3
33	Zucker	50	805	heftige Entflammung	540	1,4
34	Ruß	75	—	keine Zündung	keine Zündung	60,4
35	Getreidespeicher	20	1050	—	630	10,5
36	Stärke	80	1035	—	640	1,5
37	Spreu	0	—	keine Zündung, Probe zu grob zum Aufwirbeln	Nicht bestimmt, Staub zu grob	8,9
38	Hornmehl	50	—	keine Zündung; nur wenige Funken	670	5,3
39	Haferschalen	90	990	—	620	13,4
40	Kork	50	990	rasche Flammenausbreitung	630	1,7
41	Kork	90	1080	—	690	2,5
42	Stärke	100	960	rasche Flammenausbreitung	630	0,4

Tabelle III. Relative und niedrigste Entzündungstemperatur von 66 Staubarten nach Wheeler (Fortsetzung).

1	2	3	4	5	6	7
Tgb.-Nr.	Stoff	Vom Stoff gingen durch das 200-Maschensieb %	Relative Entzündungstemperatur ° C	Bemerkungen	Niedrigste Entzündungstemperatur ° C	Unbrennbare Substanz %
43	Gießereiruß	100	—	keine Zündung	810, kleine Flamme	10,5
44	Brikett	90	1090	—	800, kleine Flamme	9,9
45	Zichorie	80	1070	—	660	7,5
46	Malz	50	990	rasche Flammenausbreitung	600	11,7
47	Kakao	100	970	rasche Flammenausbreitung	620	8,1
48	Senf	50	1050	—	680	5,1
49	Shoddy (Lumpen)	nicht siebbar	—	konnte nicht aufgewirbelt werden	690	15,8
50	Desgleichen				610	15,9
51	Mehl	90	1060	—	650	1,5
52	Bürstenkohle	100	—	keine Zündung	keine Zündung	15,2
53	Mais	70	1010	—	645	8,0
54	Schellackkomposition	100	—	keine Zündung; nur wenige Funken	780, kleine Flamme	61,4
55	Grammophonplatten	100	1100	—	750, kleine Flamme	32,8
56	Kopalgummi	70	1010	rasche Flammenausbreitung	750	1,8
57	Holzkohle	90	—	keine Zündung; nur wenige Funken	760, kleine Flamme	10,4
58	Kohle (Gießereiruß)	70	—	keine Zündung; nur wenige Funken	830, kleine Flamme	21,4
59	Harter Koks	70	—	keine Zündung	keine Zündung	39,7
60	Bleistift-Graphit	95	—	keine Zündung	keine Zündung	78,2
61	Knochenmehl	40	—	keine Zündung; nur wenige Funken	700	48,0
62	Knochenkohle	100	—	keine Zündung	keine Zündung	77,0
63	Roggenmehl	90	1060	—	620	0,9
64	„Toter" Kork	100	1100	—	740	11,6
65	Mineral- und Elfenbeinschwarz	100	—	keine Zündung	keine Zündung	23,5
66	Desgleichen				keine Zündung	32,0

Zur Bestimmung der niedrigsten Temperatur, bei welcher noch Zündung eintreten kann, bediente sich Wheeler des folgenden Apparats (Fig. 5):

„Die Zündfläche ist eine locker gewickelte Spirale aus Kupfergewebe, die sich in einer Porzellanröhre *A* von 25 mm lichter Weite und 10 cm Länge befindet. Diese Röhre steht, wie die Figur zeigt, senkrecht. 0,2 g des

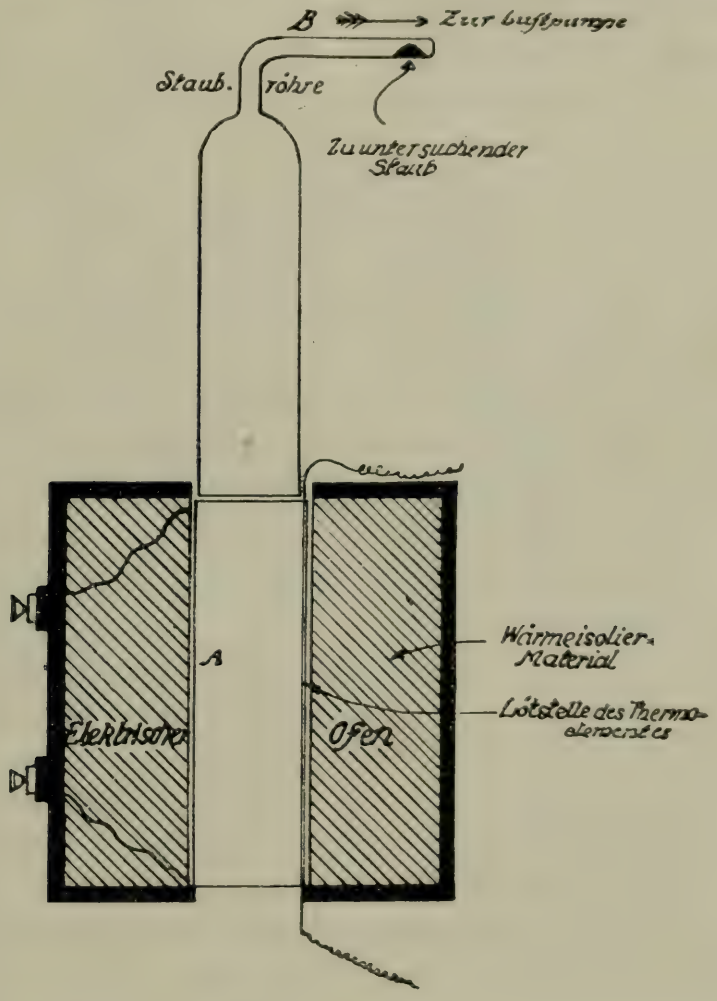


Fig. 5.
Vorrichtung zur Bestimmung der niedrigsten Entzündungstemperatur nach Wheeler.

gesiebten und getrockneten Staubes werden in die horizontale Röhre *B* gebracht. Das weite Ende dieser Staubröhre wird dann senkrecht über der Porzellanröhre angeordnet, welche durch einen kleinen elektrischen Ofen erhitzt wird. Dann wird schnell ein Hahn geöffnet, der die Verbindung mit der oben beschriebenen Vorrichtung zur Erzeugung eines konstanten Luftstromstoßes herstellt. Aller Staub aus der Staubröhre wird so nach unten

durch die erhitzte Röhre geblasen. Bei genügend hoher Temperatur entzündet er sich dort, worauf unten eine Flamme erscheint.

Bevor die Bestimmungen mit den verschiedenen Staubarten gemacht wurden, wurde eine Versuchsreihe mit Staub gleicher Zusammensetzung ausgeführt unter Variierung der Durchgangszeiten der Staubwolke durch das Rohr. Dies wurde erreicht durch Änderung der Fallgeschwindigkeit des Kolbens in der Vorrichtung zur Erzeugung des konstanten Luftstoßes. Wie zu erwarten, braucht bis zu einem gewissen Punkte die zur Entzündung erforderliche Temperatur der Porzellanröhre um so niedriger zu sein, je geringer die Geschwindigkeit der Staubwolke beim Durchgang durch das Rohr ist."

In Tabelle III sind die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der relativen und der niedrigsten Entzündungstemperatur zusammengestellt. Wheeler bringt zwei getrennte Tabellen; diese sind in Tabelle III zu einer zusammengezogen. Die Beobachtungen bei der Bestimmung der relativen Entzündungstemperatur sind in den Spalten 3 bis 5, bei der niedrigsten Entzündungstemperatur in den Spalten 6 und 7 wiedergegeben.

Wheeler betont ausdrücklich, daß seine Angaben sich nur auf die besonderen zur Untersuchung eingegangenen Staubproben beziehen und nicht unbedingt für alle Proben desselben Stoffes Geltung haben.

Auf Grund seiner Feststellungen teilt Wheeler die Staubarten in Gefahrenklassen ein.

Klasse I: Stäube, welche sich leicht entzünden und deren Flamme sich rasch ausbreitet. Die Wärmequelle braucht nur verhältnismäßig klein zu sein, wie z. B. ein brennendes Zündholz.

Klasse II: Stäube, welche sich leicht entzünden, deren Flamme sich aber nur dann ausbreitet, wenn eine ausgedehnte heiße Wärmequelle (wie z. B. der elektrische Lichtbogen) oder eine solche von langer Dauer (wie z. B. die Flamme eines Bunsenbrenners) zur Verfügung steht.

Klasse III: Stäube, welche nicht fähig scheinen unter irgendwelchen in einem Betrieb herrschenden Umständen zu entflammen, entweder weil sie a) nicht leicht eine Staubwolke bilden, b) durch eine große Menge unverbrennbarer Stoffe verunreinigt sind, oder weil c) der Stoff, aus dem sie bestehen, nicht rasch genug brennt.

Klasse I.

Zucker	Holzmehl	Roggenmehl
Röst-Dextrin	Malz	Mehl (Mehlmühlen)
Stärke	Haferschalen	Zichorie
Kakao	Mehlmühlenstaub	Brikett

Reismehl und Zuckerkehricht	Mais	Grammophonplatten
Kork	Tee	Sojabohne, extrahiert
Sojabohne, nicht extrahiert	Mischkuchen	—
	Getreidespeicherstaub	—
	Raps	—

Klasse II.

Kopalgummi	Rizinusölrückstände	Shoddy (Lumpen)
Leder	Ölkuchen	Schellackkomposition
„Toter" Kork	Kleieabfall	—
Kokosnußöl-mühlenstaub	Mühlenstaub	—
	Hornmehl	—
Reis	Senf	—
Sägemehl	—	—

Klasse III.

Organic Ammonia	Retortenkohle	Holzkohle
Tabak	Raps (russischer)	Gießereiruß
Gewürz	Ruß	Bürstenkohle
Knochenmehl	Spreu	Harter Koks
Kohle (Gießereiruß)	Drogenmehl	Bleistiftgraphit
Lampenschwarz	Baumwollsamen	Knochenkohle
Staub von Sackreinigung	Baumwollsamen und Sojabohne	Mineral- und Elfenbeinschwarz.

Einen anderen Weg zur Bestimmung der relativen Gefährlichkeit verschiedener Staubarten, nämlich den der Messung des Explosionsdruckes, haben wohl zuerst Bedson und Widdas (20) eingeschlagen. Ihre Methode ist wohl das Vorbild gewesen für die im United States Bureau of Mines für die Versuche mit Kohlenstaub herausgebildete (21), welche wieder vom United States Department of Agriculture, Bureau of Chemistry, zur Bestimmung der Entflammbarkeit organischer Staubarten übernommen und ein wenig modifiziert wurde, da sowohl Taffanels als Wheelers Methode bei der Nachprüfung durch H. H. Brown (22) unbefriedigende Resultate geliefert hat.

Den von den amerikanischen Instituten verwendeten Apparat nach Clement-Frazer zeigt die Fig. 6.

a ist der Explosionskolben, *b* die Zündvorrichtung, *c* der Maximumdruckmesser, System Crosby, *g* ein Quecksilbermanometer, welches den Druck des Gases anzeigt, mit dem der auf dem Napf *f* liegende Staub gegen die Zündvorrichtung geblasen wird. Die beiden Tuben des Explosionskolbens sind mit Gummidichtungen versehen. Mit Hilfe der Schrauben *e* wird der Explosionskolben gasdicht auf die Unterlage gedrückt. Der Quetschhahn *i* und die Kapillare *l* (2 mm lichte Weite und 60 mm Länge) dienen zur Regelung der Gas- bzw. Luftzufuhr. Die Zündvorrichtung *b*

besteht aus einem gehärteten „lavite“ Rohr, über welches der 0,23 mm dicke Platinheizdraht in 40 Windungen/Zoll gewickelt ist. Diese Heizspirale ist dicht mit einem 0,1 mm starken Platinblech umhüllt. Der Heizdraht ist vom Platinblech durch eine dünne Schicht aus Alundumzement isoliert. Die Temperaturmessung der Zündvorrichtung geschieht mittels eines Thermoelements aus Platin-Platinrhodium und eines Siemens & Halske-Millivoltmeters.

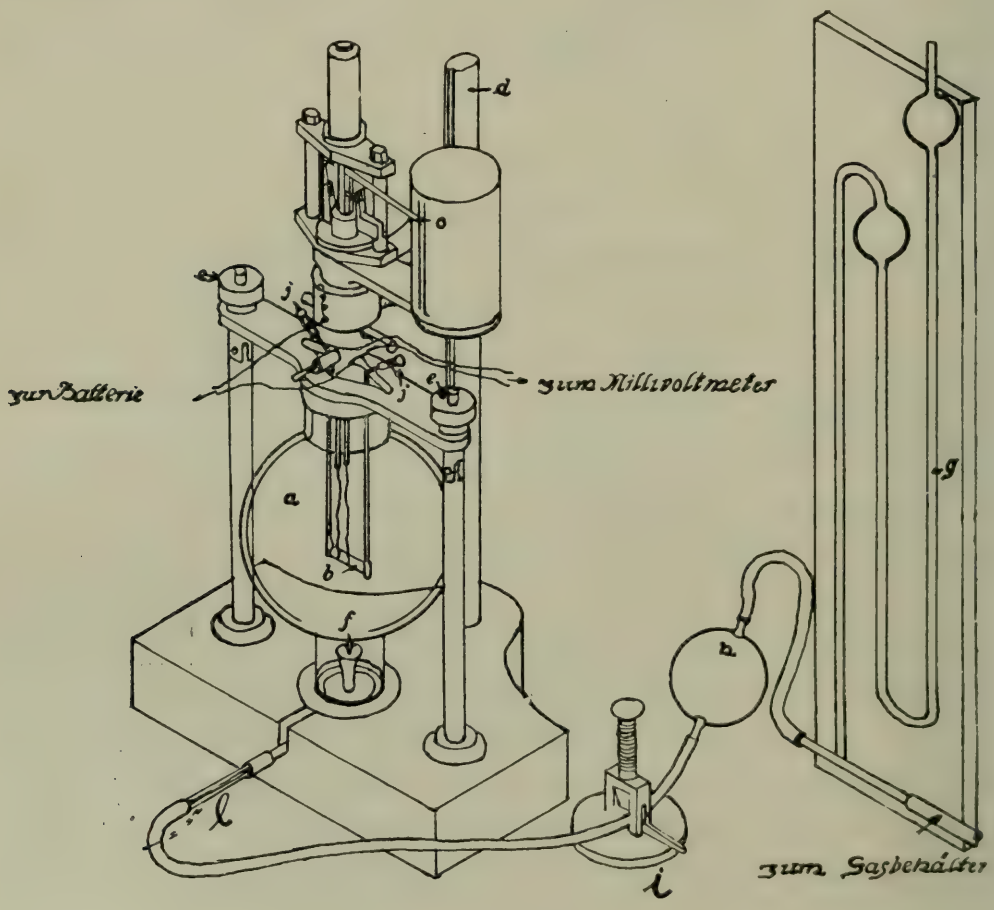


Fig. 6.
Vorrichtung zur Bestimmung der relativen Entflammbarkeit nach Clement-Frazer.

Die Messungen wurden bei den organischen Staubarten wie folgt ausgeführt:

In den Napf *f* wurden 75 mg des Staubes gebracht, welcher in der Regel durch ein 200-Maschensieb, d. i. ein Sieb von 40000 Maschen/Quadratzoll, gesiebt war. Mittels eines Luftstoßes (Druck 20 cm Quecksilbersäule) wurde der Staub gegen die 1200 ± 10^0 heiße Zündvorrichtung geblasen. Der maximale Explosionsdruck wurde am Crosby-Manometer *c* abgelesen.

Zur Untersuchung von Kohlenstaub wurden 100 mg Staub von gewöhnlicher Kohle und 300 mg von solcher mit niedriger Entflammbarkeit angewendet. Statt Luft wurde Sauerstoff bei einem Druck von 15 mm Quecksilber zum Einblasen des Staubes genommen.

Diese Methode der Messung der relativen Entflammbarkeit durch Explosionsdruck kann als die amerikanische Standardmethode bezeichnet werden.

Der Staub, welcher den höchsten Druck liefert, ist nach dieser Methode als der entflammbarste und explosionsgefährlichste zu bezeichnen.

Als Ergebnis umfangreicher Untersuchungen von Kohlenstäuben wurde vom Bureau of Mines festgestellt, daß die in den Versuchsstrecken gewonnenen Resultate sehr gut übereinstimmen mit den nach der beschriebenen Methode erhaltenen.

Wesentlich ist, daß, um vergleichbare Werte zu erhalten, stets unter den gleichen Versuchsbedingungen — namentlich bei gleicher Temperatur — gearbeitet wird. Der Einfluß der Zündtemperatur auf das Resultat, der Grad der Entflammbarkeit, ist aus Tabelle IV ersichtlich.

Tabelle IV.

Einfluß der Entzündungstemperatur auf die Entflammbarkeit.

Staubart	Druck in Pfund/Quadratzoll bei	
	1200° C	800° C
Brandsporenhaltiger Weizen .	21,4	0,6
Weißes Dextrin	15,5	7,6
Gelbes Dextrin	14,9	7,9
Weizenstärke	14,1	8,5
Roggenstärke	12,6	6,7
Zucker	13,0	7,5
Dunkelgelbes Dextrin	15,1	7,3
Kartoffelmehl	10,4	6,2
Reisstärke	12,3	5,3

In Tabelle V sind die umfangreichen amerikanischen vergleichenden Versuche über die Entflammbarkeit organischer Staubarten bei der Versuchstemperatur 1200° C, geordnet nach dem Grade der Entflammbarkeit, wiedergegeben.

Im Original (23) geben D. J. Price und H. H. Brown bei jeder Staubart die genaue Herkunft an, wie z. B. Dextrinstaub vom Röstofen oder Weizenstaub von den Seitenwänden des Elevators. Diese Herkunftsbezeichnungen habe ich weggelassen, weil ich sie für den nicht mit den örtlichen Verhältnissen vertrauten Leser für belanglos halte. Der in der Originaltabelle in Pfund/Quadratzoll angegebene Druck ist durch Multiplikation mit 0,07 in at = kg/cm² umgerechnet worden (Spalte 3 der Tabelle).

Tabelle V.

Relative Entflammbarkeit organischer Staubarten, gemessen am Explosionsdruck.

Staubart	Erzeugter Druck in Pfund/Quadratzoll	at
*Lykopodium	17,5	1,23
*Brandiger Weizen	15,9	1,11
*Gelber Mais	15,2	1,06
*Dextrinstaub	14,6	1,02
*Weizenstärke, gepulvert	14,0	0,98
*Weizen, gemischt mit brandigem Weizen	13,9	0,98
*Weißes Dextrin	13,9	0,98
*Maisstärke	13,8	0,98
*Gelbes Dextrin	13,8	0,98
Gerberlohe	13,3	0,93
*Maisstärke, gepulvert	13,2	0,92
*Weizenstärke	13,1	0,92
Dextrin	13,1	0,92
*Stärke und Dextrin	13,0	0,91
Weizenelevatorstaub	13,0	0,91
*Dextrin	12,8	0,90
Holzstaub	12,8	0,90
Hartweizen	12,8	0,90
Mehlstaub	12,7	0,89
Maisstärkeausschuß	12,7	0,89
Hafer- und Maisstaub	12,6	0,88
Weizenstaub	12,6	0,88
*Stückige Maisstärke, gepulvert	12,5	0,88
*Weißer Maisstaub	12,5	0,88
Weizenelevatorstaub	12,5	0,88
Alkalischer Stärkestaub	12,5	0,88
Saurer Stärkestaub	12,5	0,88
*Hafer- und Maisstaub vom Elevator	12,4	0,87
Weizen	12,4	0,87
Stärke	12,4	0,87
**Haferschalenstaub	12,3	0,86
*Stückzucker, gepulvert	12,2	0,85
*Kleberstaub	12,1	0,85
Roggenstaub	12,1	0,85
Staub aus Staubsammler	12,1	0,85
Roggenstaub	12,1	0,85
Haferstaub	12,0	0,84
Weizenstaub	12,0	0,84
Weizen- und Haferstaub	12,0	0,84
Kleiestaub	12,0	0,84
Zuckerstaub	12,0	0,84
Mehlstaub	11,9	0,83
Leinsamenfutter	11,9	0,83
Weizenstaub	11,9	0,83
Gerstenmalz	11,9	0,83
*Dunkelgelbes Dextrin	11,8	0,83
Futterstaub	11,8	0,83
Mehlstaub	11,8	0,83
Zuckerstaub	11,8	0,83
Zuckerstaub	11,8	0,83

Tabelle V.

Relative Entflammbarkeit organischer Staubarten, gemessen am Explosionsdruck (Fortsetzung).

Staubart	Erzeugter Druck in Pfund/Quadratzoll	Erzeugter Druck in at
*Kartoffelmehl	11,7	0,82
*Zuckermühlenstaub	11,7	0,82
Futterstaub	11,7	0,82
Leinsamenfutter, fein	11,7	0,82
Zuckerstaub	11,6	0,81
Staub von der Zwischenreinigung	11,5	0,81
Mischstaub vom Reiniger	11,5	0,81
Weizenelevatorstaub	11,5	0,81
*Reisstärke	11,3	0,79
Siebbeutelstaub	11,3	0,79
Weizenmehl	11,2	0,78
Staub vom Staubsammler, 2. Reinigung	11,2	0,78
Mehlstaub	11,2	0,78
Weizenstaub	11,2	0,78
Mehlstaub	11,2	0,78
Weizen- und Gerstenstaub	11,1	0,78
*Weizenstärke, gepulvert	11,0	0,77
Maiselevatorstaub	11,0	0,77
Roggenstaub	11,0	0,77
Staub von gedämpftem Weizen	11,0	0,77
Staub von Weizen u. Gerste, gedämpft	11,0	0,77
Staub von gedämpftem Mais	10,8	0,76
Weizenstaub	10,7	0,75
*Malzstaub	10,6	0,74
Weizenstaub	10,6	0,74
*Weizenmehl	10,5	0,73
Düngerstaub	10,5	0,73
Staub von gedämpftem Getreide	10,5	0,73
Weizenstaub, 2. Reinigung	10,5	0,73
Weizenstaub, 3. Reinigung	10,5	0,73
Weizenstaub, Staubsammler	10,5	0,73
*Tapiokamehl	10,4	0,73
*Zuckerstaub, Staubsammler	10,3	0,72
Gersten- und Weizenmehlstaub	10,3	0,72
Weizen-, Reis- und Maismehl	10,3	0,72
Roggenstaub	10,2	0,71
*Pittsburger Standardkohlenstaub	10,1	0,71
Reispoliermehl	10,1	0,71
*Gerberlohestaub	10,0	0,70
Weizenstaub	10,0	0,70
Stärkestaub	10,0	0,70
Stärkestaub	10,0	0,70
*Tapiokamehl	9,9	0,69
*Kakaostaub	9,9	0,69
Reisstaub von der Darre	9,9	0,69
Staub von geröstetem Weizen	9,9	0,69
Dextrinstaub aus dem Kochraum	9,9	0,69
Weizenseparatorstaub	9,7	0,68
Zuckerstaub	9,5	0,67
*Reduktionsmittel	9,4	0,66

Tabelle V.

Relative Entflammbarkeit organischer Staubarten, gemessen am Explosionsdruck (Fortsetzung).

Staubart	Erzeugter Druck in Pfund/Quadratzoll	at
Futtermittelstaub	9,4	0,66
*Weizenmehl	9,3	0,65
Reispolierstaub	9,3	0,65
Dextrinstaub, Kochraum	9,3	0,65
*Kakaostaub, Kühlraum	9,1	0,64
Reisstaub	9,1	0,64
Maisstaub	9,1	0,64
*Reisstärke	9,0	0,63
Flachsstaub	9,0	0,63
Weizenstaub vom Cyklon	9,0	0,63
Weizenstaub vom Conveyor	9,0	0,63
Gerstenstaub	9,0	0,63
Stärkestaub	9,0	0,63
Malzstaub	8,9	0,62
Staub von gerösteter Kleie	8,9	0,62
Staub vom Reispolieren	8,9	0,62
*Extra feines Schwefelmehl	8,8	0,62
*Weizenschmutz- und Feldstaub	8,8	0,62
Weizenstaub vom 1. Sieb	8,8	0,62
Weizenstaub vom 2. Sieb	8,7	0,61
Reiskleiestaub	8,7	0,61
Weizenstaub vom Elevatorkopf	8,6	0,60
Weizenstaub vom Cyklon	8,6	0,60
Staub von Weizen u. Gerste, gedämpft	8,5	0,60
Getreidekaffeestaub	8,5	0,60
**Weizen- u. Gerstenstaub, Reinigungsraum	8,1	0,57
Stärkestaub	8,1	0,57
Gerstenstaub	8,0	0,56
Weizenseparatorstaub	8,0	0,56
Reisstaub von der Reinigung	7,9	0,55
Gerstenstaub vom Windsichter	7,5	0,53
Winter- und Hartweizenstaub	7,5	0,53
*Korkstaub	7,4	0,52
Reisstaub	7,1	0,50
Haferelevatorstaub	7,1	0,50
Staub von gedämpftem weißen Mais	7,1	0,50
Milchpulver	7,1	0,50
Weizenelevatorstaub	7,0	0,49
Dextrinstaub	6,5	0,46
Staub von der Gerstenreinigung	6,3	0,44
Staub von gedämpftem weißen Mais	6,1	0,43
Gerstenstaub	6,1	0,43
Alfalfastaub	6,0	0,42
*Reismehl	5,6	0,39
Gerstenstaub vom Speicherboden	5,5	0,39
Weizenspeicherstaub	5,0	0,35
Gerstenstaub	4,9	0,34
Reisstaub vom Schüttler	4,8	0,34
Reisstaub (Entstaubung)	4,8	0,34
Alfalfastaub	4,3	0,30

Tabelle V.

Relative Entflammbarkeit organischer Staubarten, gemessen am Explosionsdruck (Schluß).

Staubart	Erzeugter Druck in Pfund/Quadratzoll	at
Arrow-Root-Puder	3,9	0,27
Reisstaub vom Schroter	3,9	0,27
Steinkohlenstaub	3,6	0,25
Kartoffelstärke	3,2	0,22
Flachsstaub von der Flachsreinigung . .	3,2	0,22
Gelatinestaub	1,1	0,08

Die mit * bezeichneten Stäube sind nicht gesiebt worden, die mit ** bezeichneten haben ein 100-Maschensieb passiert, alle übrigen ein 200-Maschensieb.

Den Grad der Entflammbarkeit einiger amerikanischer Kohlen, bestimmt nach der angegebenen Methode bei Anwendung von 300 mg Staub für jeden Versuch, möge schließlich noch Tabelle VI zeigen.

Tabelle VI.

Relative Entflammbarkeit verschiedener Kohlenarten.

Herkunfts-Staat	Art der Kohle	Analyse				Entflammbarkeit in	
		Feuchtigkeit	Vergasende Bestandteile	Nicht vergasender Kohlenstoff	Asche	Pfund/Quadr.-Zoll	at
Wyoming . .	Subbituminös	9,68%	39,97%	44,72%	5,63%	18,0	1,26
Utah . . .	Bituminös	3,77%	43,71%	46,46%	6,06%	17,3	1,21
Indiania . .	Bituminös	2,15%	38,60%	48,20%	11,05%	15,9	1,11
Oklahoma .	Bituminös	1,66%	38,94%	52,74%	6,66%	14,5	1,02
Pennsylvania	Bituminös	1,10%	35,93%	57,47%	5,50%	13,6	0,95
Colorado . .	Bituminös	0,68%	26,42%	54,95%	17,95%	12,3	0,86
West-Virginia	Semibituminös	0,49%	21,06%	71,45%	7,00%	9,1	0,64
Pennsylvania	Anthrazit	0,43%	9,39%	81,49%	8,69%	1,0	0,07

Die amerikanischen Forscher (24) haben in dem beschriebenen Apparat auch gezeigt — wahrscheinlich ohne Kenntnis der Englerschen Untersuchungen, aber als Bestätigung derselben —, daß ein gewisser Gehalt der Luft an brennbaren Gasen den Staub leichter entzündlich macht, also seine Entflammbarkeit erhöht. Die Kurve zeigt den Einfluß der Anwesenheit wechselnder Mengen Naturgas (Erdgas, wohl vorwiegend Methan) auf die Entflammbarkeit eines Staubes (Fig. 7).

Über den Einfluß der chemischen Natur bzw. des chemischen Verhaltens der verschiedenen organischen Staubarten auf die Entflammbarkeit sind die amerikanischen Forscher (25) zu folgendem Ergebnis gekommen:

Bei Kohlenstaub besteht kein exaktes Verhältnis zwischen der Entflammbarkeit und dem Gehalt an vergasenden Bestandteilen; es ist aber eine bestimmte Tendenz vorhanden, daß die Entflammbarkeit mit dem Gehalt an vergasenden Bestandteilen zunimmt.

Für die übrigen organischen Staubarten trifft diese bedingte Abhängigkeit der Entflammbarkeit von dem Gehalt an vergasbaren Bestand-

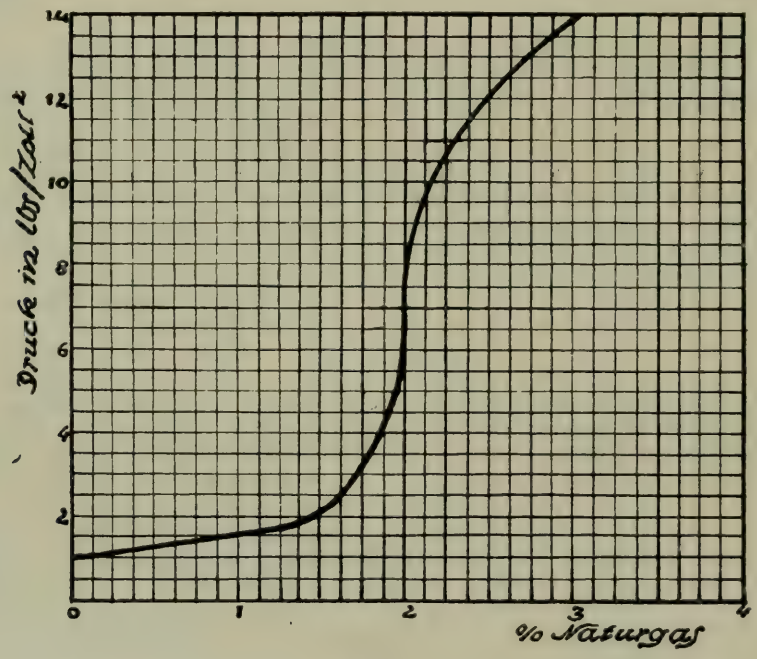


Fig. 7.
Der Einfluß brennbarer Gase auf die Entflammbarkeit von Staub-Luftgemischen.

teilen nicht zu. Die Versuche haben vielmehr ergeben, daß der Aschengehalt des Staubes, d. i. sein Gehalt an anorganischen Stoffen, die Entflammbarkeit beeinflußt. Die Entflammbarkeit sinkt mit zunehmendem Aschengehalt. So hatte z. B. ein Reisstaub, der 8,06% Asche lieferte, einen Explosionsdruck von 0,7 at erzeugt, während ein Reisstaub mit 50,40% Asche nur einen Explosionsdruck von 0,27 at ergab.

Es sei hier erwähnt, wie Alan Leighton (26) die Entzündungstemperatur von technischer Aluminiumbronze bestimmt hat. Da es ihm nicht gelungen ist, in dem Clement-Frazerschen Explosionsapparat selbst bei 1200° C -- einer Temperatur, bei welcher Kohlenstaub in dem Apparat eine kräftige Explosion gibt — Zündung zu erreichen (er betrachtet die

geringe Wärmekapazität der Zündvorrichtung des Apparats als die Ursache des negativen Versuchsausfalls), wählte er folgende primitive Versuchsanordnung: Eine kleine Schüssel aus gebranntem Ton erhitzte er in einem Muffelofen auf die Versuchstemperatur. — Gemessen wurde die Temperatur in der Muffel. — Dann wurde die Schüssel rasch herausgenommen und mit 10 g Staub bestreut. Bei 800° entzündete sich die Aluminium-

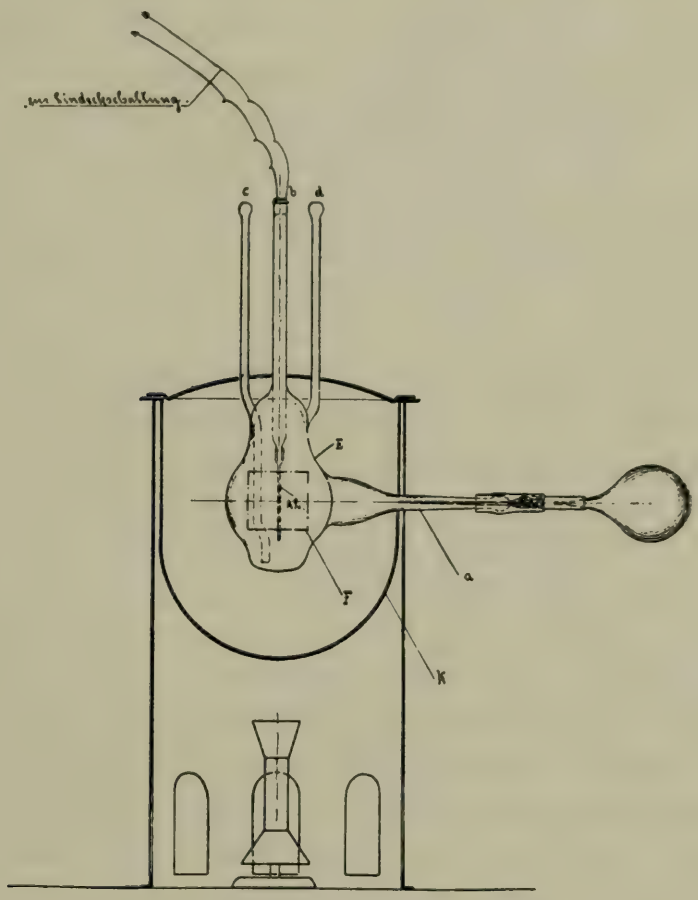


Fig. 8.
Vorrichtung zur Bestimmung der absoluten Entzündungstemperatur nach Beyersdorfer.

bronze und brannte helleuchtend ab, während Kohlenstaub selbst bei 840° bei dieser Versuchsanstellung nicht entzündet werden konnte. Die Kohle vergaste nur sehr rasch und der Koksrückstand fing schließlich an zu glühen. Leighton kommt zu dem Schluß: Die Entzündungstemperatur der Aluminiumbronze liegt niedriger als die der Standard-Pittsburgh-Kohle, das Aluminium braucht aber zur Zündung eine größere Wärmemenge als diese.

Beyersdorfers (27) Experimentalarbeit befaßt sich nur mit Zuckerstaub. Er hat einen einfachen Apparat gebaut, der gestattet, mit weit-

gehender Genauigkeit die Entzündungs- bzw. Explosionstemperatur eines jeden brennbaren Staubes zu bestimmen (Fig. 8).

Der gläserne Explosionskolben *E* ist an einem Stativ so befestigt, daß er sich in der Mitte des Kupferkessels *K* mit allseits gleichem Abstand von dessen Wandungen befindet. Der Kupferkessel ist in einen Zylinder aus Schwarzblech gehängt, der außen mit einer 3 mm starken Asbestpappe als Wärmeschutz bekleidet ist. Kupferkessel und Blechzylinder haben in Höhe der Kolbenmitte je 2 Glimmerfenster *F* ([5 cm]²) diametral gegenüber, die eine Beobachtung der Vorgänge im Kolben ermöglichen. Kupferkessel und Blechzylinder haben außerdem in der Höhe der Glimmerfenster und in beiderseits gleichem Abstand von diesen insgesamt zwei sich deckende kreisrunde Öffnungen, welche die Ein- und Durchführung des konischen Ansatzes *a* des Explosionskolbens ermöglichen. Der Explosionskolben hat ein Fassungsvermögen von rund 600 cm³. (Kugeliger Teil 9 cm Durchmesser; zylindrischer Teil 5 cm Durchmesser, 4,5 cm Höhe; konischer Teil 4 cm Durchmesser am Kolben, 16 cm Länge.) Am inneren Ende der eingeschmolzenen Glasröhre *b* ist ein flaches Säckchen aus dünnem Aluminiumblech ([4,5 cm]²) so befestigt, daß seine schwach zylindrisch-konkav zum konischen Ansatz gebogene Fläche diesem gerade zugekehrt ist. Das oben angeschmolzene Röhrchen *d* dient als Auspuff der Explosionsgase, der konische Ansatz *a* zum Einblasen des Staubes gegen das Aluminiumblech *Al*, das eingeschmolzene Röhrchen *c* zum Einleiten von Gasen. Durch die Glasröhre *b* wird bis zur Mitte des Aluminiumsäckchens *Al* das Thermometer (Thermoelement) eingeführt. Als Wärmequelle dient ein Franke-Brenner, Größe 3. Bedeckt wird der Thermostat oben mit einem Deckel aus Kupfer und zwei Deckeln aus Asbestpappe. Das Einblasen des Staubes geschieht mittels eines Gummiballes durch ein Glasröhrchen von 5 mm Durchmesser, das bis zu einer Kapillare von 1 mm Durchmesser ausgezogen ist. Der weite Teil dieser Glasröhre dient zur Aufnahme des Staubes. Die Menge des Staubes wird durch Wägung des Röhrchens vor und nach dem Einblasen bestimmt. Das Einführen der Einblaskapillare in den konischen Ansatz *a* wird erst unmittelbar vor dem Erreichen der Versuchstemperatur vorgenommen, um zu starke Erwärmung der Kapillare zu vermeiden. Aus dem gleichen Grunde muß die Spitze der Kapillare etwa beim Kupferkessel enden. Der weite Teil des Einblasröhrchens wird mit dem zur Olive aufgeblasenen Ende des konischen Ansatzes durch ein Stückchen Gummischlauch verbunden.

Das Einblasen des Staubes geschieht grundsätzlich bei fallender Temperatur. — Der Kupferkessel wird direkt erhitzt. Seine nach innen strahlende Wärme geht der Reihe nach über auf Luft im Kessel — Glas des

Explosionskolbens — Luft in diesem — Aluminiumsäckchen mit Thermometer. Die Flamme wird einige Grade vor erreichter Versuchstemperatur ausgedreht, und zwar so rechtzeitig, daß die strahlende Wärme des Kupfers gerade noch ausreicht, das Aluminiumsäckchen mit Thermometer auf etwa 1° C über Versuchstemperatur zu erwärmen. Hat dann bei fallender Temperatur das Aluminiumsäckchen die vom Thermometer angezeigte Versuchstemperatur erreicht, so wird der Staub gegen das Aluminiumblech geblasen. — Bei dieser Ausführung des Versuchs ist im Augenblick des Staubeinblasens das Aluminiumblech der heißeste Teil des ganzen Systems.

Quecksilberthermometer erweisen sich für genaue Messungen wegen der Trägheit des Quecksilberfadens als ungeeignet zur Temperaturmessung. Zweckmäßig arbeitet man mit Silber-Konstantan-Thermoelementen und der Kompensationsmethode nach Lindeck. Man kann dann die Entzündungstemperatur eines Staubes mit einer Genauigkeit von $\pm 1°$ C bestimmen.

Beyersdorfer hat auf diese Weise die Entzündungstemperatur von Zuckerstaub in Luft — der Staub war durch ein Sieb Nr. 270 mit 10000 Maschen/cm² gesiebt worden — zu $410° \pm 1°$ C ermittelt.

In Sauerstoff (97,8% O_2) wurde die Entzündungstemperatur zu 371° C und in Sauerstoff mit einem Gehalt von etwa 0,5 Vol.-% Ozon zu 367° C ermittelt, während in ozonisierter Luft die Entzündungstemperatur zu 407° C ermittelt worden ist.

Beyersdorfer ist zu der Annahme geneigt, daß Spuren Ozon durch ihre energische Oxydationswirkung auf das primär entstehende Gas etwa Explosionszentren im Gas bilden, von denen aus sich dann die Explosion schnellstens über die ganze Masse ausbreitet, so daß Ozon schon in geringster Menge als Beschleuniger wirkt.

Außer brennbaren Gasen, wie Kohlenoxyd, Methan u. dgl., erhöht also auch Ozon die Entflammbarkeit eines organischen Staubes.

Wird aber der Sauerstoffgehalt der Luft durch Beimischung unbrennbarer inerter Gase erniedrigt, so entzündet sich der Staub bei einer höheren Temperatur als in Luft mit 20,8% Sauerstoff. Die Kurve (Fig. 9) zeigt, wie in Sauerstoff-Stickstoffmischungen mit fallendem Sauerstoffgehalt die Entzündungstemperatur steigt. Während in nahezu reinem Sauerstoff sich Zuckerstaub bei 371° explosionsartig entzündet, entzündet er sich bei einem Sauerstoffgehalt der Sauerstoff-Stickstoffmischung von 6,5% ohne Explosionserscheinung — wir haben hier nur eine schwache Entflammung — erst bei 480°. Bemerkenswert ist, daß in Sauerstoff-Stickstoffmischungen Zuckerstaub sich bei Sauerstoffgehalten $> 9\%$ stets explosionsartig entzündet, während er bei Sauerstoffgehalten $< 9\%$ auch bei sehr hoher Temperatur nur

noch ohne Explosionserscheinung entflammt. Die Linie parallel zur Abszisse im Abstand 9% O_2 teilt also die Fläche rechts der Kurve in einen großen oberen Explosionsbereich und einen kleinen unteren Entflammungsbereich. Mischt man als inertes Gas, um den Sauerstoffgehalt zu erniedrigen, der Luft an Stelle von Stickstoff Kohlensäure bei, so wird die Explosions- oder Entflammungstemperatur wesentlich stärker hinaufgedrückt. Während bei 480° für Sauerstoff-Stickstoffmischungen für Zuckerstaub die Entzündungsgrenze bei 6,5% O_2 liegt, liegt sie bei Luft-Kohlensäuremischungen bei der gleichen Temperatur bei 9% O_2; oder, anders ausgedrückt: befinden sich 9% O_2 nur in Gesellschaft von 91% N_2, so entzündet sich in die Mischung geblasener Zuckerstaub schon bei ca. 423°, sind aber die 9% O_2 vergesellschaftet mit 34% N_2 und 57% CO_2, so entzündet sich in die Mischung geblasener Zuckerstaub erst bei 480° (Beyersdorfer) (27).

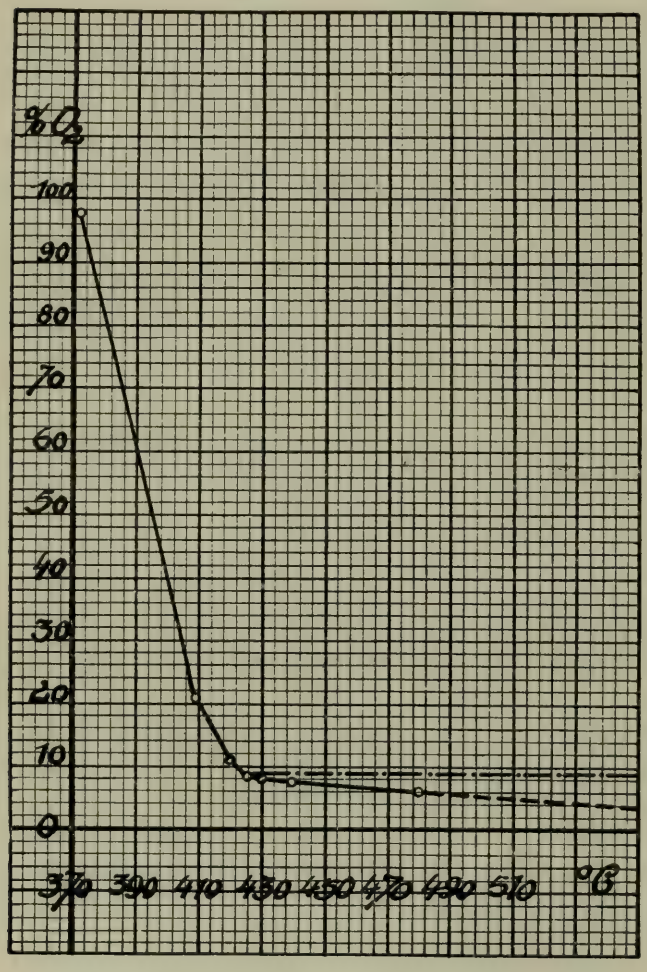


Fig. 9.
Die Entzündung von Zuckerstaub in Sauerstoff-Stickstoffmischungen.

Die die Explosionsgrenzen einengende Wirkung inerter Gase bzw. die Erhöhung der Entzündungstemperatur durch deren Anwesenheit, besonders der Kohlensäure, erklärt sich aus der besseren Wärmeleitfähigkeit der Kohlensäure, verglichen mit Luft. Nach Jorissen und Siewertsz (25) ist die Wärmeleitfähigkeitskonstante $k_{\text{Luft}} = 0{,}55 \cdot 10^{-4}$, $k_{CO_2} = 0{,}322 \cdot 10^{-4}$. Für gleiche Volumina ist bei 0° $k_{\text{Luft}} : k_{CO_2} = 633 : 718 = 0{,}88$.

Bei höherer Temperatur wird aber CO_2 ein noch besserer Wärmeleiter als Luft. Es wird $k_t = k_0 \cdot (1 + \gamma \cdot t)$, wobei $\gamma(CO_2) = 0{,}0040$ und $\gamma(\text{Luft}) = 0{,}0019$. Für 480° ist das Verhältnis $k_{\text{Luft}} : k_{CO_2} = 606 : 940 = 0{,}645$. Die Theorie wird durch die Erfahrung bestätigt.

Beyersdorfer (27) hat auch versucht, für Zuckerstaub die Explosionsgrenzen zu ermitteln. Da es ihm nicht möglich war, eine homogene Zuckerstaubwolke herzustellen — verhalten sich doch die spezifischen Gewichte von Luft und Zucker annähernd wie 1 : 1,300 —, so beschränkte er sich darauf, die obere Explosionsgrenze annähernd experimentell festzulegen und an Stelle der unteren Explosionsgrenze eine absolut zuverlässige untere Sicherheitsgrenze zu berechnen.

Beyersdorfer konnte bei dem von ihm verwendeten Explosionskolben von ca. 600 cm^3 Rauminhalt die einzublasende Zuckermenge nicht entsprechend vergrößern, d. h. bei konstantem Volumen mit veränderlichem Zuckergewicht arbeiten, da bereits beim Einblasen von 0,7 g Zuckerstaub ihm der Kolben mit großer Heftigkeit zertrümmert wurde. Darum verfuhr er umgekehrt. Er behielt annähernd die gleiche Staubmenge bei und verkleinerte das Volumen seines Versuchskolbens bis auf 41 cm^3. Als Versuchstemperatur wählte er 420°. Bei dieser Temperatur lag die obere Explosionsgrenze bei 230 mg/41 cm^3. Da der Sauerstoffgehalt des Raumes für die Explosion mit entscheidend ist, in der Praxis aber die thermischen Explosionen nicht durch gleichmäßige Erwärmung des ganzen Raumes wie beim Versuch erfolgen, sondern durch Initialzündung, wurde der Rechnung das Volumen 41 cm^3 bei 420°, reduziert auf 20°, das sind rund 17 cm^3, zugrunde gelegt. Sonach liegt die obere Explosionsgrenze für Zuckerstaub bei der Konzentration 13,5 kg/m^3.

Dieser außergewöhnlich hohe Wert für die obere Explosionsgrenze steht im Einklang mit den Erfahrungen, die I. D. Morgan (28) bei seinen Versuchen mit Lykopodiumstaub gemacht hat. Morgan, der den Explosionsdruck gemessen hat, stellte fest, daß mit steigendem Staubüberschuß der Druck sich nahezu asymptotisch Null nähert. Er gibt dafür die einleuchtende Erklärung, daß ein gewisser Teil des Staubes immer mit dem verfügbaren Sauerstoff verbrennt, der größere Rest des Staubes aber vollkommen unberührt bleibt und eine die Explosion dämpfende Wirkung ausübt.

Zur Berechnung der unteren Sicherheitsgrenze ging Beyersdorfer (27) von der Annahme aus, daß das Zuckermolekül aus seinen Bausteinen die denkbar leichtesten Gase bilde und daß diese Gase wiederum die niedrigste bisher für ein Gas ermittelte untere Explosionsgrenze haben sollen, das sind 2,4% (Pentan, Benzin). Da der Zerfall des Zuckermoleküls nach der Gleichung

$$C_{12}H_{22}O_{11} = 11\,CO + CH_4 + 9\,H_2$$

gedacht werden kann, muß die untere Explosionsgrenze des Gasgemisches höher liegen, da die der einzelnen Komponenten liegt bei 16,5% für CO, 6,1% für CH_4 und 9,45% für H_2.

Nach der hypothetischen Gleichung entstehen 21 Mol = 470 ℓ Gas. Da nach der Annahme diese 470 ℓ 2,4% des ganzen Raumes ausmachen sollen, muß dieser 19600 ℓ groß sein. Da die 21 Mol Gas aus 1 Mol = 342 g Zucker entstanden gedacht sind, liegt die untere Sicherheitsgrenze bei der Staubkonzentration 342 g/19,6 m^3 = 17,5 g/m^3.

Neuerdings haben L. J. Trostel und A. W. Frevert (29) im United States Department of Agriculture, Bureau of Chemistry, die unteren Explosionsgrenzen für einige Staubarten experimentell ermittelt. Von Webers ausgezeichneter Arbeit und Versuchsanstellung haben die amerikanischen wie auch wohl fast alle neueren Forscher auf diesem Gebiete keine Kenntnis bekommen. Interessant ist die Bemerkung von Trostel und Frevert: „Von den Werten 18, 20, 33 und 35 mg Staub/ℓ Luft für Buchweizen, Malz, Gerste und Erbsenmehl in dem Bericht eines amerikanischen Konsuls kann man sich schwer ein Bild machen, da der Bericht unterläßt, die Originalangaben zu bringen, wie diese Werte erhalten worden sind", da dem Bericht des Konsuls — wie ein Vergleich der Zahlen zeigt — unzweifelhaft die Webersche Arbeit zugrunde gelegen hat. Auch Trostel und Frevert sind sich darüber klar, daß die Hauptschwierigkeit bei allen Arbeiten zur Ermittlung der Explosionsgrenzen von Staub darin liegt, eine lang genug homogen bleibende Staubwolke zu erzeugen. Aus diesem Grunde haben auch sie die Bauer-Weinmannsche Versuchsanordnung verworfen und für ihre Zwecke den Clement-Frazerschen Explosionsapparat abgeändert. Ihre Abänderung des Apparats betrifft im wesentlichen die Vorrichtung zum Einblasen des Staubes bzw. zur Erzeugung der Staubwolke. Der Staub wurde nicht mit Sauerstoff, sondern mit Luft aufgewirbelt. Während beim Clement-Frazerschen Apparat die Luft von unten her in den kleinen Napf eintritt, welcher den Staub enthält, wird bei dem abgeänderten Apparat die Luft durch ein Kupferröhrchen von oben her auf den staubgefüllten Napf geblasen (Fig. 10).

An Stelle der Platinzündspirale haben sie auswechselbare Elektroden angebracht. Bei ihren Versuchen zündeten sie die Staubwolke auf dreifache Art:

1. durch eine glühende Platinspirale (1200° C),
2. durch einen Lichtbogen von 33 Volt und 5 Ampère,
3. durch einen Induktionsfunken von 6,5 Volt und 3 Ampère.

Den Explosionsdruck und den Charakter der Flamme benutzten sie als Kriterium für die Explosivität der Mischung. Die Flamme kennzeichnen sie wie folgt:

Gute Fortpflanzung (A): Radius der Flammenkugel mindestens 5 cm groß von der Zündstelle aus gemessen.

Positive Flamme (B): Kleine, aber deutlich sichtbare Flamme, Radius der Flammenkugel höchstens 4 cm von der Zündstelle aus gemessen.

Flackern (C): Gerade sichtbares Aufleuchten an der Zündstelle.

Keine Wirkung (0): Weder Zündung noch Explosion.

Die einzelnen Versuche, die zur Ermittlung der unteren Explosionsgrenze angestellt wurden, gibt Tabelle VII wieder.

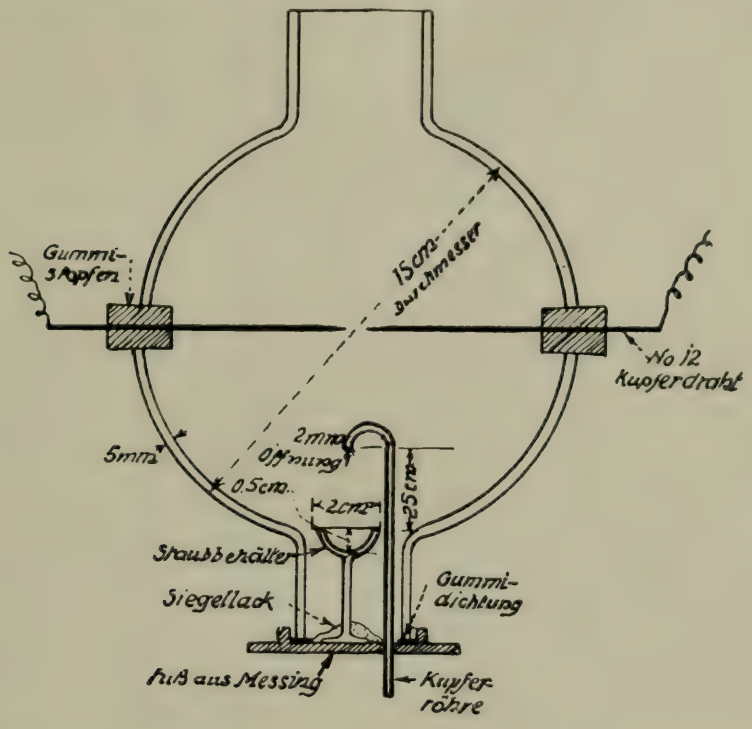


Fig. 10.
Vorrichtung zur Bestimmung der unteren Explosionsgrenze nach Trostel-Frevert.

Wo nichts anderes bemerkt, trat stets Zündung ein. Wenn die Gesamtzahl der Versuche nicht mit denen der in der Spalte „Flamme" verzeichneten übereinstimmt, so bedeutet dies, daß die fehlenden Versuche negativ waren.

Um nach den in der Tabelle verzeichneten Versuchen die untere Explosionsgrenze festzusetzen, machten Trostel und Frevert die Annahme, daß die untere Explosionsgrenze dort liegt, wo gute „Fortpflanzung", verbunden mit positivem Druck, in wenigstens 50% aller Versuche beobachtet werden konnte. Die nach dieser Auswahl erhaltenen Mindestkonzentrationen sind in Tabelle VIII zusammengestellt.

Auf Grund thermo-dynamischer Betrachtungen über die Wärmekapazität der Zündquellen und über die spezifischen Wärmen des Staubes,

Tabelle VII.

Versuche zur Ermittlung der unteren Explosionsgrenzen einiger Staubarten.

Staub			Glüh-Zündung			Bogen-Zündung			Funken-Zündung		
Art	Menge in		Zahl der Versuche	Flamme	Pfund/Quadratzoll (Mittel)	Zahl der Versuche	Flamme	Pfund/Quadratzoll (Mittel)	Zahl der Versuche	Flamme	Pfund/Quadratzoll (Mittel)
	mg	mg/ℓ									
Gepulverte Maisstärke	75	51,0	9	A	13,7	3	A	14,0	12	7×A	13,7
	25	17,2	2	A	7,2	4	A	6,7	9	8×A	4,0
	20	13,7	3	A	5,3	4	A	4,5	2	A	3,4
	15	10,3	2	A	3,2	5	A	2,3	7	B	1,8
	10	7,0	2	A	2,1	7	B	1,0	7	B	0,7
	7	4,9	4	2×C	0,3	7	B	0,4	7	3×B	0,5
	—	—	—	2×0	—	—	—	—	—	4×C	—
	5	3,4	4	1×B	0,4	4	0	0,0	8	5×C	0,0
	—	—	—	2×C	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	1×0	—	—	—	—	—	—	—
	3	2,0	5	1×C	0,2	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	4×0	—	—	—	—	—	—	—
Maiselevatorstaub	75	51,0	8	A	12,2	3	A	10,1	7	4×A	13,3
	25	17,2	2	A	5,5	4	A	5,1	3	A	2,6
	20	13,7	1	A	4,4	3	A	4,7	3	2×A	2,3
	15	10,3	1	A	3,2	4	A	3,0	3	B	1,0
	10	7,0	7	6×B	0,3	7	B	1,0	5	B	0,0
	7	4,9	3	2×B	0,1	6	B	0,4	6	0	0,0
	5	3,4	4	1×C	0,0	4	0	0,0	—	—	—
Standard-Pittsburg-Kohle	75	51,0	4	A	8,7	3	A	4,0	Keine Wirkung bei im ganzen 9 Versuchen, wovon je 3 mit 75 mg Staub 150 „ „ 500 „ „ .		
	50	34,4	4	A	6,1	4	3×A	1,9			
	—	—	—	—	—	—	1×B	—			
	35	24,1	—	—	—	3	2×A	1,3			
	—	—	—	—	—	—	1×B	—			
	30	20,1	4	A	2,5	—	—	—			
	25	17,2	5	3×A	1,7	7	3×A	1,0			
	—	—	—	2×B	—	—	4×B	—			
	20	13,7	3	B	1,1	5	2×A	0,5			
	—	—	—	—	—	—	2×B	—			
	—	—	—	—	—	—	1×0	—			
	15	10,3	3	B	0,8	4	2×B	0,4			
	—	—	—	—	—	—	2×0	—			
	10	7,0	3	A	0,5	3	2×C	0,1			
	—	—	—	—	—	—	1×0	—			
	7	4,9	3	C	0,2	—	—	—			
	5	3,4	3	C	0,1	3	2×0	0,3			
Gepulverter Zucker	75	51,0	7	A	11,4	3	A	9,7	9	2×A	11,3
	50	34,4	—	—	—	3	A	7,3	6	3×A	7,1
	35	24,1	—	—	—	3	A	6,1	8	3×B	2,5
	25	17,2	3	A	5,0	3	A	3,7	6	1×C	0,0
	20	13,7	3	A	4,3	3	B	3,1	—	—	—
	15	10,3	3	A	3,0	3	B	2,1	—	—	—
	10	7,0	3	B	2,2	3	C	1,3	—	—	—
	7	4,9	3	B	1,2	4	1×C	0,6	—	—	—
	5	3,4	5	B	0,8	6	0	0,1	—	—	—
	3	2,1	3	B	0,4	—	—	—	—	—	—
	1,5	1,0	4	3×C	0,2	—	—	—	—	—	—

Tabelle VII.

Versuche zur Ermittlung der unteren Explosionsgrenzen einiger Staubarten.

Staub			Glüh-Zündung			Bogen-Zündung			Funken-Zündung		
Art	Menge in		Zahl der Versuche	Flamme	Pfund/Quadratzoll (Mittel)	Zahl der Versuche	Flamme	Pfund/Quadratzoll (Mittel)	Zahl der Versuche	Flamme	Pfund/Quadratzoll (Mittel)
	mg	mg/l									
Aluminiumpulver	75	51,0	4	A	13,5	3	A	11,7	3	A	16,7
	50	34,4	—	—	—	3	A	10,6	2	A	12,0
	35	24,1	3	A	5,7	4	A	8,2	3	A	8,5
	25	17,2	3	A	4,0	4	A	7,0	5	A	6,7
	20	13,7	3	A	3,6	3	A	4,9	6	A	4,8
	15	10,3	2	A	2,3	5	A	3,8	5	B	2,6
	10	7,0	4	2×A	1,1	6	A	2,2	6	1×C	0,0
	—	—	—	2×C	—	—	—	—	—	—	—
	7	4,9	5	1×A	0,7	5	B	1,2	—	—	—
	—	—	—	4×C	—	—	—	—	—	—	—
	5	3,4	4	0	0,0	6	C	0,3	—	—	—
	3	2,1	—	—	—	8	4×C	0,0	—	—	—
	1,5	1,0	—	—	—	4	0	0,0	—	—	—
Weizenelevator-staub	150	100,0	—	—	—	—	—	—	3	1×B	—
	125	84,0	—	—	—	—	—	—	2	1×B	4,0
	75	51,0	8	A	12,2	6	A	9,6	5	B	1,6
	35	24,1	—	—	—	—	—	—	5	B	—
	25	17,2	3	A	5,2	4	A	4,8	—	—	—
	20	13,7	2	A	3,5	3	A	3,9	—	—	—
	15	10,3	1	A	2,0	4	A	1,9	—	—	—
	10	7,0	5	2×B	0,5	5	1×B	0,7	—	—	—
	7	4,9	4	2×B	0,2	5	3×B	0,1	—	—	—
	5	3,4	3	1×C	0,0	4	3×C	0,0	—	—	—
	3	2,0	—	—	—	4	1×C?	0,0	—	—	—
Gepulverter Schwefel	75	51,0	6	A	10,3	8	A	10,1	3	A	9,3
	35	24,1	—	—	—	—	—	—	10	A	2,2
	25	17,2	2	A	4,3	3	A	2,6	—	—	—
	20	13,7	2	A	3,4	7	A	1,5	5	A	1,4
	15	10,3	2	A	2,2	7	B	0,5	8	3×B	0,7
	10	7,0	2	A	1,3	7	B	0,2	6	3×B	0,4
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2×C	—
	7	4,9	2	B	1,0	4	C	0,1	6	5×B	0,4
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1×C	—
	5	3,4	3	C	0,3	4	0	0,0	7	1×C	0,0
	3	2,0	3	C	0,2	—	—	—	5	0	0,0

seiner Feuchtigkeit und seiner Asche kommen Trostel und Frevert zu folgender Deutung ihrer Versuchsergebnisse:

Eine allgemeingültige Beziehung zwischen Entzündungstemperatur, unterer Explosionsgrenze, relativer Entflammbarkeit und Verbrennungswärme eines Staubes ist nicht zu erkennen. Die relative Entflammbarkeit z. B. hängt nicht nur von der Verbrennungswärme, sondern auch von dem

Volumen der entsprechenden Verbrennungsprodukte ab. Mit einer Zunahme der Feuchtigkeit ist eine Abnahme der Explosionsfähigkeit verbunden.

Tabelle VIII.
Untere Explosionsgrenzen einiger Staubarten.

Staubart	in mg/ℓ Luft		
	Glüh-Zündung	Bogen-Zündung	Funken-Zündung
Stärke	7,0	10,3	13,7
Maiselevatorstaub	10,3	10,3	13,7
Weizenelevatorstaub	10,3	10,3	keine gute Fortpflanzung
Schwefel	7,0	13,7	13,7
Zucker	10,3	17,2	34,4
Aluminium	7,0	7,0	13,7
Kohle	17,2	24,1	keine Zündung

Kritische Betrachtungen über Entzündungstemperatur und Explosionsgrenzen.

Vergleicht man die von den verschiedenen Experimentatoren ermittelten Entzündungstemperaturen für ein und denselben Staub, so fällt der große Unterschied auf. So wurde die absolute Entzündungstemperatur des Zuckerstaubes ermittelt

1911 von Taffanel . . . . . zu 465° C,
1912 „ Wheeler. . . . . „ 540° C,
1919 „ Weinmann . . . . . „ 425° C,
1921 „ Beyersdorfer . . . . . „ 410° C.

Dieser immerhin beträchtliche Unterschied von 130° zwischen den äußersten Werten erklärt sich aus der verschiedenen Art der Versuchsanordnung. Wärmekapazität der Zündquelle und Temperatur deren Umgebung dürften die Hauptursachen der Unterschiede sein. Je weitgehender adiabatisch eine Versuchsanordnung zu arbeiten gestattet, um so niedriger muß die Entzündungstemperatur ausfallen. Je größer die Wärmeverluste durch Strahlung oder durch Verbrauch von Wärme durch den Staub (Schmelz- und Zersetzungswärme) und je kleiner die Wärmekapazität der wesentlichen Teile der Apparatur, um so höher muß die Entzündungstemperatur ermittelt werden.

Wir werden später sehen, daß bei der Staubexplosion der Staub in erster Phase vergast wird und daß in zweiter Phase die entstandenen brennbaren Gase zur Explosion entzündet werden. Das Vergasen eines organischen Staubes ist eine Art trockener Destillation. Bei dieser trockenen

Destillation entstehen im wesentlichen Wasserstoff, Paraffinkohlenwasserstoffe wie Methan und Äthan, Olefinkohlenwasserstoffe wie Äthylen und Kohlenoxydgas. Es ist sonach anzunehmen, daß die Entzündungstemperatur des Staubes mindestens so hoch liegt wie diejenige dieser Gase; sicher ein wenig höher, weil für das Vergasen des Staubes Wärme verbraucht wird.

Nach Dixon und Coward (30) sind die Entzündungstemperaturen der genannten Gase in Luft die folgenden:

Tabelle IX.

Entzündungstemperaturen einiger Gase in Luft.

Gas	Entzündungstemperatur
Wasserstoff . . .	580—590° C
Methan	650—750° C
Äthan.	520—630° C
Äthylen.	542—547° C
Kohlenoxyd . . .	644—658° C

Diese Werte der Entzündungstemperaturen dürften nach neueren Untersuchungen ausnahmslos zu hoch sein. Es ist sicher bei ihrer Ermittlung nicht adiabatisch genug gearbeitet worden. Neuerdings hat Cassel (31) die Entzündungstemperatur einer Wasserstoff-Sauerstoffmischung ($2H_2 + 3O_2$) durch adiabatische Kompression zu etwa 670° abs. = etwa 397° C ermittelt. Im Hinblick auf diesen Wert für Wasserstoff ist anzunehmen, daß die Entzündungstemperaturen der genannten Gase um 400° C herum liegen. Der von Beyersdorfer ermittelte Wert für Zuckerstaub — 410° C — hat sonach die größte Wahrscheinlichkeit für sich. Wenn man die von den verschiedenen Experimentatoren verwendeten Versuchsanordnungen vergleicht, wird man finden, daß Beyersdorfer am weitgehendsten unter Ausschaltung von Wärmeverlusten, d. h. adiabatisch, gearbeitet hat.

Alle die Methoden, bei denen der Staub gegen eine, wenn auch wohl definierte, so doch nur engbegrenzte Wärmequelle geblasen wird, können nur relative Werte für die Entzündungstemperatur liefern; sie können daher nur benutzt werden, um die verschiedenen Stäube nach dem Grade ihrer Gefährlichkeit zu ordnen; sie geben aber keinen Einblick in die absolute durch den Staub drohende Gefahr.

Die Angaben über die Explosionsgrenzen von Staub-Luftmischungen müssen als unsicher bezeichnet werden, weil es, wie schon betont, große experimentelle Schwierigkeiten macht, eine homogene Staubwolke von

ausreichender Beständigkeit zu erzeugen. Ich betrachte auf Grund eigener Erfahrung, die von Trostel und Frevert bestätigt wird, die von Bauer für Aluminium und von Weinmann für Zucker angegebenen unteren Explosionsgrenzen als die unsichersten (siehe S. 23). Aber auch Trostel und Frevert haben m. E. die Schwierigkeiten nicht völlig gemeistert. Sie wirbeln den Staub durch einen Luftstoß gegen die Zündquelle. Auch dabei wird sich nicht vermeiden lassen, daß bald Zonen größerer, bald Zonen geringerer Staubdichte die Zündstelle erreichen. Es wird stets ein Zufall bleiben, bei noch so gleichmäßiger Arbeitsweise, wenn die abgewogene Staubmenge den ganzen Kolbeninhalt von 1,4 ℓ gleichmäßig und bereits vor eingetretener Zündung erfüllen sollte.

Die glücklichste Hand dürfte Prof. Weber bei seiner — der ältesten — leider in Vergessenheit geratenen Arbeit gehabt haben. Wenn heute nach Webers Methodik mit unseren verfeinerten Mitteln an die Bestimmung der Explosionsgrenzen herangegangen würde, so dürften mit großer Wahrscheinlichkeit die zuverlässigsten Resultate erzielt werden.

Webers für verschiedene Mehle (Kohlehydrate) experimentell ermittelten Werte dürften vorzüglich mit den von der folgenden Theorie der Explosionsgrenzen (allerdings für Zucker, aber auch ein Kohlehydrat, das die gleichen Zersetzungsprodukte liefert wie Mehl) geforderten Werte in Einklang zu bringen sein.

Georg Jaeckel (32) hat zur Berechnung der Explosionsgrenzen von Staub-Luftmischungen folgende allgemeingültigen Anschauungen und Formeln entwickelt.

Zur Entzündung einer Staubwolke genügt nicht allein das Vorhandensein einer Wärmequelle. Die Wärme muß vielmehr von einem Element der Staubwolke auf das Nachbarelement übergehen, von diesem aufs nächste usf., wenn eine Explosion der ganzen Staubwolke eintreten soll. Die in einem Raumelement durch Verbrennung des Staubes entwickelte Wärmemenge muß so groß sein, daß das Nachbarelement auf die Entzündungstemperatur des Staubes gebracht wird.

Diese einfachste Bedingung gilt, wenn die Wärmequelle ausgedehnt und eben ist, so daß nur Wärmefluß in einer Richtung senkrecht zur Grenzfläche der Wärmequelle vorhanden ist.

Die untere Explosionsgrenze wird dadurch gegeben, daß eine Mindeststaubmenge vorhanden sein muß, damit bei der Verbrennung die nötige Anzahl Kalorien für die Erwärmung des Staub-Luftgemisches im Nachbarvolumen frei wird. Die obere Explosionsgrenze ist durch den beschränkten

Sauerstoffvorrat bedingt, der nur die Verbrennung einer bestimmten Staubmenge zuläßt — also eine feste obere Grenze für die Verbrennungswärme setzt — und mit diesem Wärmegewinn durch die Verbrennung nur die Erwärmung einer gewissen Höchstmenge Staub auf die Entzündungstemperatur gestattet. Es sei

c_1 = spezifische Wärme der Luft bei konst. Vol. = 0,17 cal/g · Grad,
s_1 = Dichte der Luft bei 10° C = 0,00125 g/cm³,
q = Verbrennungswärme des Staubes in cal/g,
c_2 = spezifische Wärme des Staubes (cal/g · Grad),
t = Anfangstemperatur,
T = Entzündungstemperatur des Staubes,
p = in der Wolke vorhandene Staubmenge in g/cm³,
n = Staubmenge in g/cm³, bei der noch vollkommene Verbrennung mit der vorhandenen Luft möglich ist,
V = Wärmeverluste in cal/cm³, hauptsächlich hervorgerufen durch Wärmeausstrahlung an nicht direkt benachbarte Teile.

Für die Ausbreitung der Explosion gilt dann die Bedingungsgleichung — eine ähnliche verwendet auch Eitner (33) —

$$p \cdot q \geqq V + (T - t) \cdot (p \cdot c_2 + s \cdot c_1), \qquad (1)$$

$$p \cdot [q - (T - t) \cdot c_2] \geqq V + (T - t) \cdot s_1 \cdot c_1. \qquad (2)$$

Der Wärmeverlust V besteht offenbar darin, daß von der zuerst gezündeten und verbrennenden Staubschicht Wärme durch Strahlung und Leitung an nicht unmittelbar benachbarte Teile der Wolke oder an die Wände des Explosionsraumes abgegeben wird. Solche Wärmeverluste werden praktisch immer vorhanden sein; denn ehe ein Raumelement der Wolke auf Entzündungstemperatur gebracht ist, gibt es schon Wärme an die kälteren Nachbarelemente durch Strahlung und Leitung weiter. Wenngleich diese Vorwärmung entfernterer Schichten nach der Entzündung der zweiten Schicht für die weitere Ausbreitung der Explosion förderlich ist, so bedeutet sie doch für die Entzündung der zweiten Schicht selbst einen Verlust und erfordert von der zuerst verbrannten ersten Schicht die Zuweisung eines größeren Wärmevorrates $p \cdot q$, als zur Entzündung der zweiten Schicht allein notwendig wäre. Setzt man der Luft Kohlensäure zu, so wird wegen der besseren Wärmeleitfähigkeit der Kohlensäure der Wärmeverlust und damit auch die untere Explosionsgrenze steigen. Der Wärmeverlust wird ferner abhängen von Gestalt und Material der Wände des Explosionsraumes, die ja auch durch Strahlung in Wärmeaustausch mit der Staubwolke stehen. Wir rechnen nun mit dem für die Ausbreitung der

Explosion günstigsten praktischen Fall, daß die Wärmeverluste $V = 0$ werden, um eine absolut zuverlässige untere Explosionsgrenze zu erhalten. Ferner wollen wir zur Begünstigung der Explosion annehmen, daß die Vorgänge bei konstantem Volumen erfolgen. Für diesen Fall ist die spezifische Wärme der Luft

$$c_1 = 0{,}17 \text{ cal/g} \cdot \text{Grad},$$

während sie bei konstantem Drucke

$$c = 0{,}238 \text{ cal/g} \cdot \text{Grad}$$

wäre. Bei 10° Anfangstemperatur und 760 mm Druck ist die Dichte der Luft 0,00125 g/cm³. Wird die Luft teilweise durch Kohlensäure ersetzt, so steigt das Produkt $s \cdot c_1$, wodurch die untere Explosionsgrenze heraufgesetzt wird.

Die rechte Seite der Gleichung (2) hat also unter normalen Verhältnissen bei Ausschluß von Wärmeverlusten den kleinsten Wert: $(T - t) \cdot s_1 \cdot c_1$. Wir erhalten für die untere Explosionsgrenze die Bedingungsgleichung

$$p = \frac{(T - t) \cdot s_1 \cdot c_1}{q - (T - t) \cdot c_2} + \frac{V}{q - (T - t) \cdot c_2}. \tag{3}$$

Zur oberen Explosionsgrenze gelangen wir theoretisch durch eine ähnliche Überlegung. Der in einem Kubikzentimeter enthaltene Sauerstoff kann nur eine ganz bestimmte Staubmenge (n g) vollständig oxydieren. Ist mehr Staub als n g/cm³ in der Luft vorhanden, so werden bei organischen Stäuben die entstehenden Oxydationsprodukte nur zu einem gewissen Teil die Endprodukte der vollkommenen Verbrennung — CO_2 und H_2O — sein. Der übrige Teil wird aus der großen Zahl der möglichen Produkte einer unvollständigen Oxydation bestehen, z. B. aus Kohlenoxyd, Kohlenwasserstoffen, Alkoholen, Aldehyden, Ketonen, Säuren u. dgl.

Der einfachste theoretisch vorstellbare Fall ist der, daß nur n g Staub vollständig verbrannt werden, der noch überschießende Teil aber nur durch die Wärme, ohne daß der Luftsauerstoff mit ihm in Reaktion tritt, verändert wird, was bei steigender Staubkonzentration immer mehr Wärme erfordert. Es muß darum bei zunehmender Staubkonzentration schließlich eine Konzentration P erreicht werden, deren Überschreitung eine Explosion unmöglich macht und die sich berechnen läßt nach der Gleichung

$$n \cdot q \geqq V + (T - t) \cdot (c_2 \cdot P + s_1 \cdot c_1). \tag{4}$$

Die Staubkonzentration bei der oberen Explosionsgrenze beträgt sonach

$$P \leqq \frac{n \cdot q - V}{(T - t) \cdot c_2} - \frac{s_1 \cdot c_1}{c_2}. \tag{5}$$

Diese Bedingungsgleichung ist ein ziemlich sicherer Ausdruck für die obere Explosionsgrenze, da die Wärmeverluste V in diesem Falle außer aus den üblichen Wärmeverlusten durch Strahlung noch aus den Wärmemengen bestehen, die aufzuwenden sind, um den Staub, der nicht mehr vollkommen verbrennen kann, zu schmelzen, zu zersetzen und schließlich zu vergasen.

Unter der Annahme, daß keine Wärmeverluste vorhanden sind ($V = 0$), sind die Gleichungen (3) und (5) der zuverlässige Ausdruck der unteren und oberen Sicherheitsgrenze für einen beliebigen Staub. Kennt man von einer Staubart die absolute Entzündungstemperatur, die Verbrennungswärme und die spezifische Wärme, so lassen sich die unteren und oberen Explosions- bzw. Sicherheitsgrenzen berechnen. Diese Formeln zeigen ganz allgemein, daß eine Staubart um so leichter zur Explosion neigt, einen um so größeren Explosionsbereich hat, je größer ihre Verbrennungswärme ist im Verhältnis zu dem Produkt

Entzündungstemperatur $\times$ spezifische Wärme.

Die Zuverlässigkeit der entwickelten Theorie sei an dem Spezialfall des Zuckerstaubes geprüft. Wir setzen $T = 410^0$, das ist die von Beyersdorfer ermittelte und auch von Trostel und Frevert als zuverlässig bezeichnete Entzündungstemperatur für Zuckerstaub:

$$t = 10^0,$$
$$c_2 = 0{,}35 \text{ cal/g} \cdot \text{Grad},$$
$$q = 4000 \text{ cal/g} \quad \text{und}$$
$$n = 0{,}000255 \text{ g/cm}^3$$

und erhalten dann

$$p = 22 \text{ g/m}^3 \quad \text{und} \quad p = 7 \text{ kg/m}^3.$$

Diese Werte stimmen mit den experimentell ermittelten befriedigend überein.

Zu den gefährlichen Eigenschaften des Staubes gehört auch seine elektrische Ladung. Der Vollständigkeit halber sei dies hier erwähnt, aber erst im nächsten Kapitel soll ausführlich darauf eingegangen werden.

Literatur.

1) P. Beyersdorfer: Kolloid Ztschr. 31 (1922), S. 331.
2) R. Weber: Verh. Ver. Beförderung Gewerbefleiß, 1878, S. 91.
3) H. Stockmeier: Beilg. z. Ber. Bayr. Gewerbemuseums, 1904, S. 4. — Bayr. Gewerbeztg. 11 (1898), S. 261. — Ztschr. Unters. Nahr. Genußmittel 2 (1899), S. 49. — Ztschr. angew. Chem. 19 (1906), S. 1665.

4) Weinmann: Ztschr. Berg-, Hütt.-, Sal.-Wesen 68 (1920), S. 100.
5) Eitner: Unters. üb. d. Expl.-Grenzen brennbarer Gase u. Dämpfe (Habilitationsschrift), Oldenbourg, München 1902.
6) l. c. 4, S. 105.
Brunswig: Schlagwettersichere Sprengstoffe, Urban & Schwarzenberg, Berlin, 1910, S. 70.
7) Vital: Annales des mines, Ser. 7, vol. 7 (1875), S. 180.
8) R. Weber: Verh. Ver. Beförderung Gewerbefleiß, 1878, S. 83—103.
9) Bauer: Ztschr. angew. Chem. 1917, Nr. 39.
10) Galloway: Proc. Roy. Soc. Lond. 1876, S. 168. — Annales des mines, Ser. 7, vol. 11 (1878), S. 229. — Bull. Soc. Ind. Minerale, Ser. 2, vol. 9 (1880), S. 157.
11) Mallard u. Le Chatellier: Annales des mines, Ser. 7, vol. 20 (1881), S. 121.
12) Hilt: Ztschr. Berg-, Hütt.-, Sal.-Wesen 32, S. 575.
13) Engler: Chem. Ind. 8 (1885), S. 171.
14) Faraday: Final Report, Accidents in Mines Comm. England, 1886, S. 30.
15) R Holtzwart u. E. v. Meyer: Dingl. Polyt. Journ., 1891, S. 185.
16) Watson Smith: Journ. Soc. Chem. Ind. 25 (1906), S. 54.
17) S. F. Peckham: Journ. Soc. Chem. Ind. 26 (1907), S. 244.
18) Taffanel u. Durr: Compt. rend. 152 (1911), S. 718. — Cinquième série d'essais sur les inflammations de poussières. Paris 1911. Comité central des houillières de France.
19) R. V. Wheeler: Journ. Chem. Soc. Lond. 103, S. 1715.
20) Bedson u. Widdas: Trans. Inst. Min. Eng. 32 (1907), S. 529.
21) J. C. W. Frazer, E. J. Hoffmann u. L. A. Scholl: U. S. Bureau of Mines, Bull. 50 (1913), S. 60.
J. K. Clement u. L. A. Scholl: U. S. Bureau of Mines, Bull. 102 (1916), S. 76.
J. K. Clement u. J. N. Lawrence: U. S. Bureau of Mines, Techn. Paper 141 (1917), S. 27.
22) H. H. Brown: Journ. Ind. Eng. Chem. 1917, S. 269.
23) Dust Expl., S. 26.
24) Dust Expl., S. 23.
25) Dust Expl., S. 42 u. 43.
26) Alan Leighton: U. S. Bureau of Mines, Techn. Paper 152 (1918).
27) P. Beyersdorfer: Ber. Dtsch. Chem. Ges. 55 (1922), S. 2568. — Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 72 (1922), S. 475.
28) J. D. Morgan: Proc. Inst. Civil Engineers, Vol. 196, Session 1913/14, Part. II.
29) L. J. Trostel u. A. W. Frevert: Chem. Metallurg. Eng. 30 (1924), S. 141. Übersetzung: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 74 (1924), S. 656.
30) Dixon u. Coward: Trans. Chem. Soc. 95, S. 517.
31) Cassel: Annal. Phys. 51 (1916), S. 685.
32) Gg. Jaeckel: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 73 (1923), S. 117. — Ztschr. techn. Phys. 5 (1924), S. 67.
33) l. c. 5, S. 100.

V. Die gefährlichen Energieformen.

Die Energie kann in den beiden Formen Wärme und Elektrizität zur Ursache einer Staubexplosion werden. Die Wärme ist als Explosionsursache seit langem erkannt und anerkannt. Nicht aber die Elektrizität. Darüber, ob die elektrostatische Eigenladung des Staubes eine Explosion auszulösen vermag, gehen die Ansichten noch auseinander. Wir wollen im folgenden versuchen, die anerkannten wie auch die umstrittenen Anschauungen, soweit sie sich auf Experimente und verbürgte Beobachtungen aus der Praxis stützen, zu entwickeln.

Die Wärme.

Daß eine unmittelbare Wärmequelle — ein „Brand", wie Holtzwart und v. Meyer sagen (siehe S. 25) — wie z. B. irgendeine Flamme, ein offenes Licht, ein brennendes Zündholz, glimmender Tabak, eine berstende elektrische Lampe u. dgl. eine Explosion auslösen kann, ist ohne weiteres klar. Das sind alles Wärmequellen, deren Temperatur über 500° liegt. Und die absolute Entzündungstemperatur der meisten Stäube dürfte kaum höher liegen.

Durch Wärme kann aber auch, ohne daß eine regelrechte Flamme oder ein Feuer mit dem brennbaren Staub hinreichender Konzentration in Berührung kommt, eine Explosion verursacht werden. An und in den Zerkleinerungsmaschinen der verschiedensten Bauart und Wirkungsweise kann bei nicht sorgfältiger Wartung und durch unglückliche Zufälle sich gelegentlich Wärme bis zur gefährlichen Menge durch Reibung bilden. Ein nicht genügend geschmiertes oder verschmutztes oder zu stark angezogenes Lager kann sich heiß laufen. Die Temperatur kann dabei so hoch werden, daß das Öl zu brennen anfängt. Wenn der Fall eintritt — was allerdings nur bei gröbster Fahrlässigkeit vorstellbar ist —, daß Lager und Welle über 400° heiß werden, dann kann es, wenn sich in unmittelbarer Nachbarschaft des Lagers schwebender Staub in gefährlicher Konzentration vorfindet, zur Explosion kommen. Die Lager befinden sich in der Regel nicht innerhalb, sondern außerhalb der Zerkleinerungsmaschine. Die gefährliche Staubkonzentration pflegt aber nur in der Zerkleinerungsmaschine und nicht im Arbeitsraum, also außerhalb der Maschine, aufzutreten, es sei denn, daß gerade ein Sack od. dgl. mit feinstem Mahlgut platzt. Die durch ein heiß gelaufenes Lager drohende Gefahr wird darum auf ein Mindestmaß reduziert. Die Fälle, daß die Flamme des brennenden

Schmieröls aus dem Raum zwischen Lagerschale und Welle ins Innere der Mahlmaschine hineinschlägt oder daß durch Wärmefluß von der erhitzten Welle nach Teilen im Innern der Maschine auch diese — mit ihrer immerhin großen Wärmekapazität — auf über 400° erhitzt werden, dürfen als höchst seltene Zufälle bezeichnet werden. Trotz alledem besteht aber eine gewisse Explosionsgefahr durch heißgelaufene Lager.

Eine weitere Möglichkeit der Bildung gefährlicher Wärmemengen ist gegeben durch Reibung bewegter Maschinenteile aneinander. Zu eng gestellte Mahlscheiben oder Mahlwalzen können sich warm laufen. Auch für Schlagkreuzmühlen (Desintegratoren u. dgl.) besteht bei nicht exakt sitzenden Schlagbolzen die gleiche Gefahr. Die Gefahr wächst mit der Umlaufsgeschwindigkeit. Schnell laufende Mühlen sind darum gefährlicher als langsam laufende. Die Gefahr durch das Heißlaufen von Mahlwalzen in Walzenstühlen z. B. wird durch zwei Umstände vermindert. Die eigentlichen Mahlkörper sind in der Regel verhältnismäßig große Metallmassen und als solche relativ gute Wärmeleiter von großer Wärmekapazität. Sie werden sich also erst durch lang anhaltendes Aneinanderreiben auf gefährliche Temperatur erwärmen können. Jede Mahlwalze eines mittleren Walzenstuhls wiegt ca. 300 kg. Nehmen wir als Material derselben Gußstahl an, dessen spezifische Wärme $c = 0{,}12$ cal/g · Grad ist, dann müssen den beiden Walzen, um sie um rund 400° zu erwärmen, $2 \cdot 300 \cdot 400 \cdot 0{,}12 = 28800$ kcal durch Reibung zugeführt werden, das ist eine Wärmemenge, die äquivalent ist der Energie, die in etwa 4 kg Steinkohle aufgespeichert ist. Zur Veranschaulichung des eben Erörterten sei an einen einfachen physikalischen Versuch erinnert.

Zwei gleich lange und gleich dicke Stäbe, der eine aus Holz, der andere aus Metall (Eisen, Messing, Kupfer), sind an einem Ende mit Schreibpapier in einfacher Lage umwickelt. Hält man die Stäbe in eine breite, nicht leuchtende Bunsenflamme, so verkohlt das auf den Holzstab geklebte Papier, dieser selbst brennt bereits, während am Metallstab das Papier noch unversehrt ist. An dem schlechten Wärmeleiter Holz bleibt die Wärme lokalisiert, von dem guten Wärmeleiter Metall wird sie sofort weiter geleitet, wodurch das Papier vor dem Verbrennen selbst innerhalb der sehr heißen Flamme geschützt wird.

Als zweiter die Gefahr einschränkende Umstand kommt folgende Eigenschaft der meisten Stäube in Frage. Die Mehrzahl der organischen Staubarten schmilzt und zersetzt sich bei Temperaturen, die weit unter Entzündungstemperatur liegen (Zucker z. B., für dessen Staub die Entzündungstemperatur bei 410° liegt, schmilzt und zersetzt sich bereits bei 160°). Zum Schmelzen und Zersetzen ist Wärme nötig. Diese Wärme kann nur

den Mahlwalzen unter gleichzeitiger Abkühlung derselben entnommen werden. Die Erwärmung der Mahlwalzen mit ihrer großen Wärmekapazität wird kaum in so kurzer Zeit erfolgen, daß sich der Wärmeentzug durch das schmelzende oder sich zersetzende Mahlgut nicht fühlbar machen würde. Wenn also die Walzen sich erst einmal auf die Schmelztemperatur des Mahlgutes erwärmt haben, dann wird ihre weitere Erwärmung langsamer erfolgen. Die der Reibung entgegenwirkende mehr oder weniger gute Schmierfähigkeit des geschmolzenen Mahlgutes wird außerdem noch bei manchen Stoffen, wie Zucker, den Temperaturanstieg hemmen. Die Explosionsgefahr durch sich heiß reibende metallene Mahlwalzen oder -scheiben ist wohl vorhanden, sie sollte aber nicht überschätzt werden.

Was anderes ist es bei Mahlsteinen. Steine sind schlechte Wärmeleiter. Die durch Reibung erzeugte Wärme bleibt auf der Reibfläche lokalisiert und kann darum in kurzer Zeit eine gefährliche Höhe erreichen. Schließlich — und dieser Fall dürfte von den Fällen der Reibungswärme der häufigste sein — kann eine Entzündung des staubfeinen Mahlgutes dadurch herbeigeführt werden, daß metallische oder mineralische Fremdkörper mit dem Mahlgut in die Mühle gelangen, wo sie durch die mannigfache mechanische Bearbeitung in mehr oder weniger kurzer Zeit, je nach der Art der Zerkleinerungsmaschine, auf gefährliche Temperatur erhitzt werden können. So können z. B. mit dem Mahlgut Schraubenbolzen und -muttern, Nägel, Drahtstücke u. dgl., auch Steine in die Zerkleinerungsmaschine gelangen. Sind die Teile groß genug, haben sie also eine ausreichende Wärmekapazität, so können sie in Maschinen, die eine intensive Bearbeitung des Fremdkörpers zulassen, wie z. B. Schlagkreuzmühlen und Riffelwalzenstühlen, bis auf gefährliche Temperatur erhitzt werden. Darüber besteht kein Zweifel. Sind aber die Fremdkörper sehr klein oder sehr spröde, dann ist ihre Gefährlichkeit wesentlich geringer. Kleine metallische Fremdkörper können nur einen sehr geringen Wärmevorrat aufspeichern, der bald von dem Mahlstaub verzehrt sein wird, ehe er selbst auf Entzündungstemperatur gebracht ist. Spröde Fremdkörper, wie die meisten Steine, werden bei der mechanischen Bearbeitung binnen kurzem in viele kleine Stückchen von geringer Wärmekapazität zersplittert werden, für die dann dasselbe gilt wie für die kleinen Metallstückchen.

Durch die Zerkleinerungsmaschinen können auch von den Fremdkörpern, ohne daß diese auf die Entzündungstemperatur des Staubes kommen, Funken weggeschlagen werden. Verfasser ist der Ansicht, daß die Gefährlichkeit solcher Funken vielfach überschätzt wird, womit keineswegs gesagt sein soll, daß große Funken, die aus verhältnismäßig großer glühender Masse bestehen, also einen immerhin beträchtlichen verfügbaren

Wärmevorrat haben, unter allen Umständen ungefährlich sind. Wenn auch die Wahrscheinlichkeit sehr gering ist, daß sie eine Explosion veranlassen können, so besteht doch immerhin noch die Möglichkeit für den unglücklichen Zufall, daß solche Funken im Vollbesitz ihrer Energie in eine Staubpartie gerade ausreichender Konzentration hinein geraten.

Wegen der heute noch herrschenden Überschätzung der Gefährlichkeit glühender Funken seien im folgenden einige Ansichten, Versuche und Rechnungen zu diesem Gegenstand wiedergegeben.

Prof. Weber (1) schreibt: „Zur Zündung des Mehles (ist) einmal eine verhältnismäßig hohe Temperatur und dann auch eine erhebliche Wärmemenge erforderlich. Hieraus erklärt sich die bemerkenswerte Tatsache, daß kleine, selbst stark erhitzte Körperteilchen (Metall, Stein) den Mehlstaub nicht entzünden, was als ein glücklicher Umstand zu bezeichnen ist; denn weit öfter würden Brandunfälle durch Staubentzündungen entstanden sein, wäre der Staub durch feine glühende Partikelchen eines Funkenstromes so leicht entzündlich wie Schwamm oder Zunder. Was die Funken betrifft, so sollte man glauben, es müsse ein Strom derselben, wie er sich beim Schleifen von Metallen auf rasch rotierenden Sandsteinen entwickelt, den Mehlstaub unfehlbar entflammen. Dies ist aber, wie der Verfasser beobachtete, nicht der Fall; es konnte vielmehr ein durch Andrücken eines harten Stahlgegenstandes gegen eine Schmirgelscheibe entwickelter lebhafter Funkenstrom durch entzündbaren Mehlstaub geleitet werden, ohne daß dessen Entflammung erfolgte. Diese zuerst überraschende Erscheinung erklärt sich daraus, daß die betreffenden Stahl- bzw. Steinpartikelchen zu klein im Verhältnis zu den mit ihnen in Berührung gekommenen Mehlteilchen sind, und demzufolge der durch Zersetzung des Mehles bedingte Wärmeverlust so erheblich ist, daß nun der Wärmegrad der Partikeln zur Zündung nicht mehr ausreicht. Bei leichter entzündlichen Körpern, z. B. Zunder alter Feuerzeuge (halb verkohltem Leinengewebe), trockenem, fein faserigem Schwamme usw., welche eine so tief greifende Zersetzung, wie das Mehl, vor der Entzündung nicht erfordern, genügt schon ein derartiges Partikelchen, um die Zündung herbeizuführen.

Körper von größerer Abmessung entzünden den Mehlstaub, wenn ihr Wärmegrad selbst nicht der hellen Rotglut entspricht. Vermittels einer erhitzten Eisenstange, welche während der verschiedenen Phasen des Erkaltens mit Mehl bestäubt wird, lassen sich die entsprechenden Beobachtungen anstellen. Man erkennt, daß an der heißen Metallfläche zuerst Dämpfe entstehen, welche sich, wenn der Wärmegrad der geeignete ist, entzünden. — Wie am glühenden Eisen, so entzündet sich auch an glühender Kohle von genügend großer Oberfläche und bei ausreichendem Hitzegrade

der Mehlstaub, während die Entzündung nicht stattfindet, wenn die Kohle nicht ausreichend heiß oder ihre Oberfläche mit Asche belegt ist. An einem dünnen Stäbchen schwach glühender, sog. Sprengkohle, sowie auch an einer kleinen Lunte entflammte ein Staubstrom von gewöhnlichem Mehle nicht.

Größere glühende Stein- oder Metallpartikel dagegen, wie solche durch zwischen die Mühlsteine gelangte Eisenteile (Nägel usw.) oder durch Aufschlagen schwach beschütteter, schlecht zentrierter oder zu eng gestellter Steine sich bilden können, entflammen den Mehlstaub. Dieses erweisen direkte Beobachtungen."

Anläßlich von Versuchen, die vom U. S. A. Department of Agriculture und dem Pennsylvania State College (2) angestellt wurden, wurden in eine Attritionmill (horizontale Achse, ca. 2200 Umdrehungen/min), in der explosiblen Staub bildende Stoffe gemahlen wurden, während des Mahlens nacheinander etwa 5 Pfund Feuersteine und Nägel geworfen. Bei 40 Versuchen keine Explosion! Zu diesem negativen Versuchsergebnis bemerken D. J. Price und H. H. Brown (3): „Die bloße Tatsache, daß bei diesen Versuchen keine Explosion erzielt wurde, beweist nichts. Ohne Zweifel passieren viele Fremdkörper die Mahlmaschinen, ohne daß eine Explosion eintritt; aber da aus dieser Ursache viele Explosionen stattgefunden haben, sollte jede Vorsichtsmaßnahme getroffen werden, um zu verhindern, daß Fremdkörper in die Mahlmaschinen gelangen."

Georg Jaeckel und P. Beyersdorfer (4) schreiben über ihre Versuche, die bezweckten, eine Zuckerstaubwolke durch Funken zu zünden — sie haben über 100 solcher Versuche angestellt —: „Es wurde Bedacht darauf genommen, Funkengarbe und Staubstrahl im gleichen Raum, mit gleicher Richtung und mit möglichst gleicher Geschwindigkeit zu erzeugen, um den Funken Gelegenheit zu bieten, solange als möglich mit denselben Staubteilchen in Berührung zu bleiben. Diese Versuchsausführung sollte die Zündung erleichtern. Denn je länger ein Funke mit einem oder einer gewissen Anzahl von Staubteilchen fliegt, um so restloser kommt die ihm eigene Wärme diesen Staubteilchen im Ausgleich zugute, um so mehr Aussicht besteht, daß die Wärmemenge des Funkens ausreicht, um den Zucker zu schmelzen, zu vergasen und schließlich zu zünden ... Trotz unserer für eine Zündung außerordentlich günstigen Versuchsanordnung verliefen die zahlreichen Versuche negativ. Wir konnten sogar beobachten, daß die Funkengarbe, wie sie beim maschinellen Schärfen eines Kreissägeblattes entsteht, jedesmal bei Berührung mit dem Staubstrahl im Nu ausgelöscht wurde."

Darüber, unter welchen Bedingungen Zündung einer Staubwolke durch Funken möglich erscheint, hat Georg Jaeckel (5) theoretische Er-

wägungen angestellt. Unter der Annahme, daß der Funke in der Lage ist, auf seiner Bahn eine Kette aufeinanderfolgender Staubteilchen zu zünden, müssen, um eine Fortpflanzung der Zündung zu ermöglichen, von jedem gezündeten Elementarvolumen, das 1 Staubteilchen enthält, 8 gleichgroße Nachbarvolumina gezündet werden. Wie groß ist dann die geringste und die höchste Staubkonzentration, bei der die Ausbreitung der Explosion möglich ist?

Gleichung (2) (S. 53) für die untere Explosionsgrenze geht für diesen Fall über in

$$p \geqq \frac{8 \cdot (T - t) \cdot s_1 \cdot c_1 + V}{q - 8 \cdot (T - t) \cdot c_2} \tag{6}$$

und Gleichung (4) (S. 54) für die obere Explosionsgrenze in

$$P \leqq \frac{n \cdot q}{8 \cdot (T - t) \cdot c_2} - \frac{s_1 \cdot c_1}{c_2} - \frac{V}{8 \cdot (T - t) \cdot c_2}. \tag{7}$$

Für das Beispiel des Zuckerstaubes erhält man aus diesen allgemeinen Gleichungen durch Einsetzen der Zahlenwerte auf S. 53 u. 55

$$p \geqq (0{,}000236 + 0{,}000347 \cdot V)\ \text{g/cm}^3$$

$$P \leqq (0{,}000300 - 0{,}000893 \cdot V)\ \text{g/cm}^3.$$

Für den Idealfall, daß keine Wärmeverluste eintreten, daß also $V = 0$ wird, ergibt sich, daß bei Zucker Funkenzündung nur möglich ist unter den gemachten Voraussetzungen zwischen den Staubkonzentrationen 236 g/m³ und 300 g/m³.

Geht man nicht wie Jaeckel von der Annahme aus, daß ein gezündetes Elementarvolumen 8 Nachbarvolumina entflammt, sondern nur 6, was ebenfalls geometrisch vorstellbar ist (Fig. 11), so erhält man, indem man in den Gleichungen (6) und (7) statt 8 die Zahl 6 einsetzt

$$p' = 160\ \text{g/m}^3 \quad \text{und} \quad P' = 600\ \text{g/m}^3.$$

Der Gefahrenbereich wird größer. — Immerhin lassen diese Erwägungen der reinen Funkenzündung nur einen geringen Grad von Wahrscheinlichkeit, der noch dadurch verringert wird, daß die Wärmeverluste V in praxi kaum gleich Null sind.

Die Unsicherheit der speziellen Rechnung liegt, wie Jaeckel betont, im Zahlenwert für c_2. Denn zunächst gilt die mittlere spezifische Wärme für den Staub nur etwa bis zu seiner halben Entzündungstemperatur ($\frac{1}{2}\,T$); von da ab bis zu T liegt ein Gemisch der gasförmigen Zersetzungsprodukte des Staubes vor, für das im allgemeinen keine wohl definierte

spezifische Wärme bekannt ist. — Die durch die Ungenauigkeit von c_2 bedingte Unsicherheit des Resultats wird aber dadurch gemildert, daß q im Vergleich zum Produkt $(T - t) \cdot c_2$ groß ist. (Für Zucker z. B. ist $q = 4000$ und $(T - t) \cdot c_2 = 140$ cal/g.)

Neben der Reibungswärme kann noch die Joulesche Wärme bzw. der elektrische Kurzschlußfunke in stauberzeugenden Betrieben der Anlaß einer Explosion werden.

Zerbricht eine elektrische Glühlampe in einer Atmosphäre gefährlicher Staubkonzentration, so kann dies zur Explosion führen. Bei der hohen Temperatur des glühenden Fadens erscheint dies nicht verwunder-

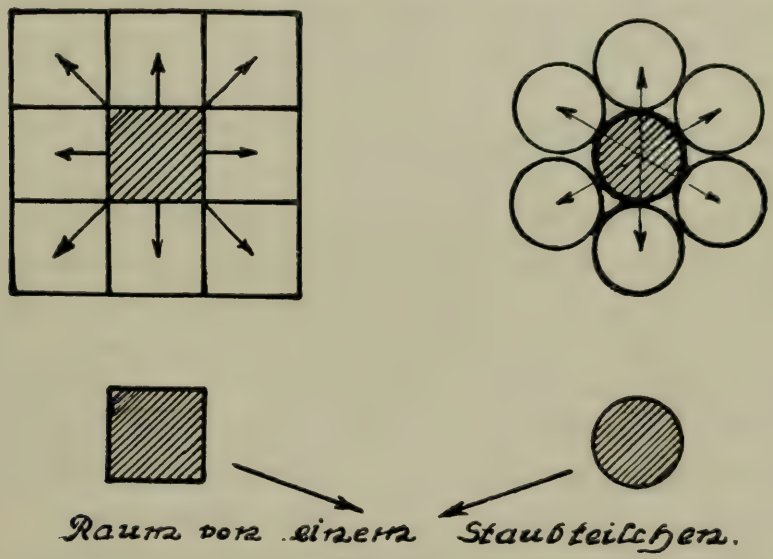


Fig. 11.
Zündungsmöglichkeiten der Elementarvolumina einer Staubwolke durch Funken.

lich. Die amerikanischen Forscher haben den experimentellen Nachweis für diese Explosionsmöglichkeit erbracht (6).

Daß der elektrische Kurzschlußlichtbogen, der in elektrischen Licht- und Kraftleitungen leider keine Seltenheit ist und der schon manchen gewöhnlichen Brand verursacht hat, unter geeigneten Bedingungen eine Staubexplosion auslösen kann, liegt auf der Hand. — Gefährlicher als Kurzschluß ist Erdschluß. Beim Kurzschluß wird, wenn der eigentliche Kurzschlußlichtbogen nicht gezündet hat, die Gefahr meistens durch die Sicherungen beseitigt. Der Erdschluß bedingt aber öfters eine starke Erwärmung des ganzen Leitungsdrahtes, die diesen sogar zum Glühen bringen kann, wenn die nächste Sicherung nicht durchgeschmolzen wird. Wegen der unter Umständen großen Längenausdehnung des heißen Leitungsdrahtes ist die Gefahr entsprechend groß. Gleich gefährlich können überlastete Leitungen werden.

Eine thermische Gefahrenquelle, die bisher wenig Beachtung gefunden hat und auf die vielleicht noch manche unaufgeklärte Staubexplosion zurückgeführt werden kann, ist die pyrophore Kohle. E. v. Schwarz (7) schreibt u. a. über die Bildung pyrophorer Kohle: „Ein Holzgebälk, das ständig der ausgestrahlten Wärme einer Lampe, eines Dampfrohres, einer heißen Leitung, eines Heißluftkanals ausgesetzt ist, desgleichen angesammelte Staubmassen, schlechte Wärmeschutzmassen usw. können jederzeit selbstentzündliche Röstkohle erzeugen; hohe Temperaturen sind hierzu nicht notwendig, bei Dampf genügt die übliche Dampfwärme (bei 2 bis 5 Atm.) von 120 bis 150°. — Ist die Wirkung einer schwachen Wärmequelle auf Holz und organische Stoffe nur periodisch, also wie z. B. bei Fabriken mit nur Tagesbetrieben, so ist die Möglichkeit einer Röstkohlenbildung nicht beseitigt; sie wird zwar zeitlich verzögert, ist sie aber eingetreten, so kann die Entflammung bei sogar noch niedrigerer Temperatur erfolgen, unter günstigen Verhältnissen reichen schon 150° aus (anstatt 230 bis 270°). — Der Grund dieser thermisch früher eintretenden Gefahr liegt darin, daß das mit der Zeit völlig porös werdende Holz sich in seinen ganzen Massen weit mehr mit Sauerstoff aus der Luft beladen kann (Holz vermag evtl. das 30- bis 90fache seines Volumens an Gasen aufzunehmen), weil es bei der Abkühlung wieder Zeit findet, feuchten Sauerstoff anzuziehen und weil das stets wiederholte Anwärmen sauerstoffbeladenen Holzes die Bildung der Röstkohle fördert.“ Was v. Schwarz hier über Holz schreibt, gilt sinngemäß für die meisten organischen Staubarten.

Daß organischer Staub auf nicht mit Schutzglocken versehenen Glühlampen die Bedingungen zur Umwandlung in pyrophore Kohle vorfindet, möge Tabelle X zeigen, welche die höchste Temperatur der Glasbirnen verschiedener elektrischer Glühlampen wiedergibt.

Tabelle X.
Temperaturen elektrischer Lampen (8).

Art der Lampe	Höchsttemperatur
Vakuumlampe:	
50 Watt . .	67° C
100 „ . .	67° C
150 „ . .	69° C
Gasgefüllte Lampe:	
75 Watt . .	118° C
100 „ . .	126° C
150 „ . .	170° C
200 „ . .	164° C
300 „ . .	146° C

Die Zahlen sind Mittelwerte mehrerer Versuche. Man sieht: gasgefüllte Lampen sind gefährlicher als Vakuumlampen.

Nach L. Wöhler (9) wird die Entflammung pyrophorer Kohle durch die Anwesenheit von Eisenoxyd begünstigt. Eine eisenoxydhaltige Kohle explodiert bisweilen bei der Adsorption von Sauerstoff bei niedriger Temperatur, eine eisenoyxdfreie nicht.

P. W. Edwards (10) berichtet über eine Zellstoffstaubexplosion, die höchstwahrscheinlich auf Entflammung pyrophorer Kohle zurückzuführen ist. Auf 178° heißen Überhitzerrohren hatte sich Zellstoffstaub angesammelt, welcher durch trockene Destillation bei dieser Temperatur in pyrophore Kohle umgewandelt worden war. Eine andere Explosionsursache muß in diesem Fall auf Grund der angestellten Erhebungen als ausgeschlossen bezeichnet werden.

Gewisse Staubarten, welche der Autoxydation fähig sind, können durch Selbstentzündung zur Explosionsursache werden. Zur Selbstentzündung durch Autoxydation neigen im allgemeinen nur solche Stoffe, welche ihrer chemischen Natur nach Doppelbindungen zwischen Kohlenstoffatomen enthalten. So sind z. B. viele Stein- und Braunkohlenarten autoxydabel, auch Naturstoffe, die reich sind an Ölen und Fetten. Ein Staub, der seiner Natur nach nicht autoxydabel ist, kann es werden, wenn er mit Öl benetzt oder getränkt wird. „Wenige Tropfen Öl aus einer undichten Lampe, einer geschmierten Transmission machen diese Staubschichten zu Pyrophoren und hier an dieser einsamen Stelle bricht dann ein Brand aus, dessen Entstehung ganz rätselhaft erscheint und unaufgeklärt bleibt, weil niemand an seine Ursache denkt," schreibt E. v. Schwarz (11). Dennstedt (12) hat eine einfache Methode zur Bestimmung der Selbstentzündlichkeit durch Autoxydation angegeben.

Einer sonderbaren Staubexplosion sei noch Erwähnung getan, welche sich am 1. Oktober 1923 in einer Trockenmilchfabrik ereignet hat und über die W. A. Noel (13) berichtet. Die Milch wurde nach dem Zerstäubungstrockenverfahren mittels eines Luftstromes von etwa 80° C bis auf 3 % Feuchtigkeit getrocknet. Die Entzündung des Milchpulvers hat in dem trichterförmigen Boden der Trockenkammer, aus dem das Pulver auf eine Förderanlage fiel, stattgefunden. Wie das die Explosion auslösende Feuer entstanden ist, konnte noch nicht einwandfrei geklärt werden. Durch die Explosion wurde die ganze Trockenanlage vernichtet; Schaden 25000 $. Der Fall sei hier nur registriert, weil er zeigt, daß unter Umständen Zerstäubungstrockenanlagen, die immer mehr Eingang finden, für organische Stoffe zum Explosionsherd werden können.

Die statische Elektrizität.

Es sind heute zwei Möglichkeiten der Bildung gefährlicher elektrostatischer Ladungen bekannt. Statische Elektrizität kann sowohl außerhalb wie innerhalb einer Mühlenmaschine entstehen. Anders ausgedrückt: es können sowohl dem Staub fremde als auch dem Staub eigene elektrostatische Ladungen zur Gefahrenquelle werden. Von der dem Staub fremden elektrostatischen Energie ist heute nur die sog. Riemenelektrizität bekannt.

Bereits H. Stockmeier (14) hat 1904 in einem Experimentalvortrag auf die Gefahr der Riemenelektrizität hingewiesen. Er führte aus: „So wurde wiederholt beobachtet, daß in der Nähe von Transmissionen auflagernder (Aluminium-)Staub glimmend wurde ... Derartige Zündungen müssen wohl auf die bekannte Erscheinung der Treibriemenelektrizität zurückgeführt werden. Zwar habe ich mich durch Versuche überzeugt, daß durch Treibriemenelektrizität weder eine Aluminiumstaub-Luftmischung zur Explosion, noch Aluminiumstaub zur Entzündung gebracht werden kann, dagegen ist aber Wasserstoff bzw. Wasserstoff-Luftmischung durch Treibriemenfünkchen entzündbar. In den erwähnten Fällen ist deshalb Aluminiumstaub irgendwie feucht geworden und entwickelte Wasserstoff, dieser wurde entzündet und bildete dann eine Feuerbrücke für das übrige Aluminium. Es ist deshalb auch der Riemenelektrizität Aufmerksamkeit zu schenken."

Auch Bunte und Eitner (15) haben die Ansicht ausgesprochen, daß die Riemenelektrizität in der Lage ist, Brände und Explosionen auszulösen. Sie führen die Explosionen in der Brauindustrie beim Pichen der Fäßer mit maschinell betriebenen Einspritzapparaten auf Riemenelektrizität zurück. Im gleichen Jahre (1907) hat M. M. Richter (16) Messungen der Spannungen der Riemenelektrizität durchgeführt, welche die Ansicht von Bunte und Eitner bekräftigten. Richter hat in der Mitte des Riemens (130 mm breiter Lederriemen bei 2 m Scheibenabstand und 600 bis 2000 Umdrehungen/min) Spannungen bis zu 13000 Volt gemessen. Die Funkenstrecke der in Abständen von 20 sec folgenden Entladungen betrug bei seinen Laboratoriumsversuchen 2—3 cm. Das Eisen der Riemenscheibe wurde negativ, der Lederriemen positiv erregt. Unmittelbar an der Riemenscheibe wurde stets das Potential 0 gemessen. Richter ist auf Grund seiner Versuche der Ansicht, daß die Erregung lediglich von der Zahl der Umdrehungen abhängig ist und daß Erregung und Tourenzahl in einem direkten Verhältnis stehen. Seine Versuche an einer Poliermühle für Aluminiumbronze, bei denen er festgestellt hat, daß die Erregung bei 100

Touren die gleiche war, ob der Riemen leer oder voll lief, lassen ihm wahrscheinlich erscheinen, daß die Riemenelektrizität nicht auf Riemenrutsch, sondern auf das Abheben des Riemens zurückzuführen sei. Ob die Dutzende von Aluminiumstaubexplosionen, welche in jenen Jahren die Nürnberger Aluminiumbronzeindustrie heimgesucht haben, auch durch die Riemenelektrizität veranlaßt worden sind, läßt er dahingestellt.

Neuerdings wurden vom U. S. A. Department of Agriculture (17) umfangreiche Untersuchungen in Laboratorium und Betrieb durchgeführt, um die Größe der elektrischen Ladungen besonders auf großen Treibriemen zu ermitteln. Auf einem 12 Zoll breiten doppelten Lederriemen, welcher mit einer Geschwindigkeit von etwa 2750 Fuß/min über zwei Riemenscheiben von 21 und 48 Zoll lief, wurden Spannungen von mehr als 50000 Volt gemessen. Bei den Betriebsversuchen in Mühlen und Getreidespeichern wurde in allen Fällen auf allen Riemen statische Elektrizität festgestellt. Als Höchstwert wurden 75000 Volt gemessen auf einem 22 Zoll breiten, ledernen Hauptantriebsriemen.

Auf einem Gummitransportband, das mit einer Geschwindigkeit von nur 750 Fuß/min leicht brandigen Weizen vom Elevatorkopf nach dem Silo beförderte, wurden, obwohl Gleitung und Reibung des Bandes nicht nennenswert waren, 45000 Volt gemessen. Ein ähnliches Band, welches im Erdgeschoß den gleichen Stoff beförderte, zeigte nur einige 100 Volt Spannung, vermutlich weil das Band im Erdgeschoß in etwas feuchterer Luft lief und teilweise Erdschluß hatte.

In einer Baumwollsamenölkuchenmühle in Texas fanden nacheinander zwei Explosionen statt in einer eben erst aufgestellten sog. Hammermühle. Die wagrechte Achse der Mühle machte 1000 Umdrehungen/min. Man hatte anfänglich geglaubt, daß Fremdkörper wie Bolzen, Nuten u. dgl. mit den Ölkuchen in die Mühle gekommen wären und daß durch Funkenzündung des Staubes die Explosion eingetreten sei. Durch die gründlichen Nachforschungen wurde jedoch diese Explosionsmöglichkeit als ausgeschlossen festgestellt. Man kam schließlich zu dem Ergebnis, daß durch Gleiten des Riemens auf der Riemenscheibe, was immer eintrat, wenn viel Ölkuchen der Mühle zugeführt wurden, elektrostatische Ladungen entstanden, die sich auf der Achse ansammeln konnten, weil diese durch das Ölhäutchen in den Lagern isoliert worden ist. Die Ansammlung der Elektrizität hörte sofort auf und keine Explosionen fanden mehr statt, nachdem Achse und Mühlengehäuse geerdet worden waren.

Auch die amerikanischen Forscher haben festgestellt, daß unmittelbar an der Riemenscheibe die Spannung 0 ist, daß sie zunimmt bis zur Mitte des Riemens, von da abfällt, um bei der zweiten Riemenscheibe wieder 0 zu

werden. Sie sind der Ansicht, daß zweifellos ein großer Teil der statischen Elektrizität durch Gleiten des Riemens erzeugt wird und wahrscheinlich ein kleinerer Teil derselben durch die Reibung des bewegten Riemens an der Luft. Um die Abhängigkeit der elektrischen Ladung des Riemens von dessen Spannung festzustellen, haben sie Versuche mit locker, mittelstraff und normalstraff gespannten Riemen angestellt und durch Messung des elektrischen Potentials an stets der gleichen Stelle des Riemens folgende Werte erhalten:

Locker gespannter Riemen	28200 Volt,
mittelstraff gespannter Riemen	24800 „
normalstraff gespannter Riemen	18000 „

Auf Grund dieser Messungsergebnisse kommen sie mit Recht im Gegensatz zu M. M. Richter zu dem Schluß, daß der Riemenrutsch die Ursache der elektrostatischen Ladungen ist.

Verfasser kann nach eigenen Betriebsbeobachtungen der Anschauung der amerikanischen Forscher nur beipflichten. Ein Beispiel: Ein Riemen trieb gleichzeitig einen Sichter und eine Förderschnecke an. Wenn die Förderschnecke stark beansprucht war, sprangen intensiv leuchtende, kugelblitzähnliche Funken von anscheinend 1—3 cm Durchmesser mit lautem Knall von dem Treibriemen nach dem ca. 15 cm entfernten Schutzgitter. Wenn die Schnecke leer lief oder nur schwach belastet war, hörten die elektrischen Entladungen auf.

Die Anschauung der amerikanischen Forscher, daß die Zunahme der elektrischen Aufladung des Riemens von der Riemenscheibe aus nach der Mitte zu auf Reibung mit der Luft zurückzuführen ist, dürfte nicht haltbar sein. Diese Erscheinung wird man zwanglos und richtiger so erklären können: Solange der Riemen in Berührung mit der Scheibe ist, stehen z. B. die negative Ladung der Scheibe und die positive Ladung des Riemens einander in Anziehung gegenüber. Durch die Fortbewegung des Riemens wird eine die Anziehung überwindende Arbeit, Trennungsarbeit, geleistet. Wo der Riemen die Scheibe dicht umhüllt, haben wir gleichsam einen Kondensator. Durch die Arbeit gegen die elektrischen Anziehungskräfte verkleinern wir seine Kapazität und erhöhen somit seine elektrische Energie und seine Spannung. Folgender Versuch, der im Prinzip bereits 1795 von Volta angestellt worden und der für spätere Betrachtungen auch noch von Bedeutung ist, möge das eben Erörterte veranschaulichen.

Wir stellen uns einen Kondensator her, indem wir eine Metallplatte oder ein Stück Stanniol mit paraffiniertem Papier (einem Isolator) bedecken und darauf eine Metallplatte stellen, die mit einem isolierenden Griff (Glas-

oder Hartgummistab) in der Mitte senkrecht zur Platte versehen ist. Die untere Metallplatte verbinden wir mit der Erdleitung eines Elektroskops, die obere mit dessen Ladesonde. Das Elektroskop zeige nur Spannungen von etwa 200 Volt aufwärts an. Verbinden wir die mit Griff versehene Metallplatte mit einem Pol der Lichtleitung von 220 Volt Spannung und legen deren anderen Pol an die Erdleitung, so zeigt das Elektroskop zunächst keinen oder nur einen unbeträchtlichen Ausschlag. Heben wir nun die Kondensatorplatte am Griff hoch, so schlägt das Elektroskop recht deutlich und kräftig aus. Die gegen die Anziehungskräfte der elektrischen Ladungen geleistete mechanische Arbeit äußert sich in erhöhter Spannung (größerer Voltzahl).

Elektrostatische Ladungen, die im Innern von Mühlen auftreten, hat für den Sonderfall der in der Aluminiumbronzeindustrie verwendeten Steig- und Poliermühlen zuerst M. M. Richter (18) als Explosionsursache angesprochen. Er vertritt den Standpunkt, daß durch Reibung der in diesen Mühlen verwendeten Bürsten aus Schweinsborsten am Eisenmantel der Mühle die Elektrizität entsteht und daß, sobald Eisen und Bürsten sich trennen — was oben am Deckel möglich ist —, durch die so bedingte Potentialerhöhung ein Funke auftreten kann, der, sofern Luft- und Staubgehalt im richtigen Verhältnis stehen, eine Explosion auszulösen vermag. Selbst unter ungünstigen Versuchsbedingungen (Regenwetter) konnte er im Betrieb elektrische Erregung nachweisen. Seine Versuchspoliermühle lieferte Richter, als er den Polwechsel durch Anpassung an die Verhältnisse der Praxis vermieden hatte, so reichliche Mengen Elektrizität, daß er sie als „einen neuen Typus einer Elektrisiermaschine" bezeichnet. — Richter hält die meisten der damaligen Explosionen in der Aluminiumbronzeindustrie für reine Aluminiumstaubexplosionen mit elektrischer Zündung.

H. Stockmeier (19) läßt dem gegenüber in einer Polemik den Standpunkt durchblicken, daß es sich sehr wohl entgegen Richters Ansicht primär um reine Knallgasexplosionen handeln könne, wozu der Wasserstoff geliefert würde durch die Reaktion zwischen dem Aluminium und seinem Wassergehalt (0,5—2,5 %) bei der relativ hohen Temperatur im Innern der Poliermühle (31°—37° C).

Auch O. Edelmann (20) nimmt gegen Richters Anschauung Stellung. Nach ihm ist Aluminiumpulver ein zu guter Leiter der Elektrizität, als daß es einen Spannungsunterschied aufkommen lassen könnte. Er führt die an der Außenseite der Maschine beobachtete Ladung auf Riemenelektrizität zurück. Lose daliegendes Aluminiumpulver konnte er durch elektrische Funken bei 720 Volt Spannung nicht entzünden. Bei längerer Einschaltung von 1000 Volt Wechselstrom wurde das Pulver

jedoch entflammt, wenn auch ohne Sprühen. Edelmann hält die Entzündung durch Elektrizität von allen Ursachen für die harmloseste.

In einer zweiten Abhandlung gibt Richter (21) außer der Riemen- und Borstenelektrizität als gefährliche dritte Elektrizitätsquelle die Erregungen des Oxyds an. Haber hatte ihn darauf hingewiesen, daß Aluminium in Form von Staub sich an seiner Oberfläche wie ein Oxyd, also nicht wie ein Konduktor, sondern wie ein Isolator verhält. Als Stütze für seine Anschauung der elektrischen Ursache vieler Aluminiumstaubexplosionen schreibt Richter zum Schluß:

„Seit meiner Publikation im Jahre 1906 haben sich drei (oder vier) Explosionen zugetragen und zwar nur in Poliermühlen und eigentümlicherweise in dem gleichen Betrieb. Die Explosion vom 27. Juli 1906 im Betriebe der Aktiengesellschaft vorm. Schlenk in Barmsdorf muß geradezu als eine Musterexplosion bezeichnet werden. Sie ereignete sich in dem neuen Werk am ersten Tage der Betriebseröffnung, etwa 90 Sek. nach dem Einrücken der betreffenden Poliermühle. Der Schaden beschränkte sich auf das hölzerne Untergestell, die Maschine nebst Inhalt blieb unversehrt. Von einem Warmlaufen der Maschine kann bei der kurzen Betriebszeit keine Rede sein. Auch ist die Entzündung sicher nicht von der Maschine selbst, sondern in dem Unterbau vor sich gegangen. Es bleibt somit nur die Annahme übrig, daß elektrostatische Ladungen aufgetreten sind, welche im Untergestell Influenzerscheinungen hervorgerufen haben."

Während der Kriegs- und Nachkriegsjahre wurden auf Veranlassung der amerikanischen Ministerien, namentlich des U. S. A.-Department of Agriculture (22) sehr umfangreiche Untersuchungen über die Ursachen von Staubexplosionen gemacht. Die Untersuchungen über die große Zahl von Explosionen und Bränden, welche in Dreschmaschinen vorgekommen sind, haben die amerikanischen Forscher auf die Möglichkeit von elektrischen Ursachen von Staubexplosionen geführt. Beim Dreschen brandigen Weizens (stinking smut), wobei die Sporen des Brandpilzes als dichte Staubwolken in die Luft hinausgeschleudert werden, wurden, wenn die Luft sehr trocken war, große Mengen statischer Elektrizität erzeugt und auf den Maschinen angesammelt. Die Entladung der statischen Elektrizität in der Brandsporenstaubwolke führte zur Entzündung und Explosion derselben. Wenn brandiger Weizen bei ungewöhnlich trockenem Wetter gedroschen wurde, waren Spannungsmessungen von 50000 Volt und mehr keine Seltenheit. Es wurde beobachtet, daß, wenn abwechselnd sauberer und brandiger Weizen gedroschen wurde, die elektrostatische Ladung auf verschiedenen Teilen der Maschine jedesmal beträchtlich zunahm, wenn brandiger Weizen gedroschen wurde. Die amerikanischen Forscher D. J. Price und H. H.

Brown schließen daraus, daß die statische Elektrizität nicht nur durch das Laufen der Maschine gebildet wird, sondern daß ein Teil derselben durch den Staub, insonderheit den „Brand"staub, erzeugt wird. Es gelang ihnen auch im Laboratorium eine Wolke aus brandsporenhaltigem Getreidestaub mittels des Funkens einer gewöhnlichen Helmholtzschen Elektrisiermaschine zu entzünden. Sie bezeichnen die Versuche als die ersten, welche endgültig zeigen, daß der elektrostatische Entladungsfunke Staubwolken entzünden und daß er infolgedessen als Ursache von Staubexplosionen eine bedeutende Rolle spielen kann.

Als Kuriosum erwähnen Price und Brown, daß dem einen von ihnen ein Mann bekannt ist, der das Leuchtgas eines gewöhnlichen Schnittbrenners in seinem Zimmer durch die elektrostatische Entladung zu entzünden pflegt, die von seinem Finger zum Brenner überspringt und die in seinem Körper dadurch erzeugt wurde, daß er auf einem schweren, rauhen Teppich den Flur entlang gegangen ist.

Über die Zündfähigkeit eines elektrostatischen Entladungsfunkens zwischen den Polen einer Funkenstrecke kommen Price und Brown (23) auf Grund ihrer Versuche zu folgendem Ergebnis: Die Zündfähigkeit ist ausgesprochener am negativen als am positiven Pol, bei gewisser Frequenz nimmt sie zu, wenn ein Widerstand in Serie eingeschaltet wird; sie ist unabhängig von der Spannung und nimmt im allgemeinen zu mit der Stromstärke; von der Frequenz der Funken ist sie etwas abhängig, am kleinsten bei mittlerer Frequenz; und schließlich nimmt sie ab mit zunehmender relativer Feuchtigkeit.

So konnte Baumwolle beliebig lange Zeit an den positiven Pol der Funkenstrecke gehalten werden, ohne daß es zur Zündung kam, während sie sich augenblicklich entzündete, wenn sie nach dem negativen Pol hin bewegt wurde. — Der Einfluß des Feuchtigkeitsgehaltes der Luft geht aus folgenden Versuchsdaten hervor: Bei 30 % relativer Feuchtigkeit war die kritische Stromstärke, bei der gerade noch Zündung der Baumwolle eintrat, ca. 0,125 Milliamp., bei 60 % relativer Feuchtigkeit der Luft — aber bei Verwendung von möglichst trockener Baumwolle — 0,23 Milliamp.

Price und Brown beschreiben und erklären eine Reihe von Explosionen in Mühlen, die höchstwahrscheinlich auf die Eigenelektrizität des Staubes zurückzuführen sind. In einer Stärkefabrik in New Jersey (24) fand im September 1914 eine verhängnisvolle Explosion statt, die von einem Dextrinsichter ausgegangen ist. Der Sichter machte 16 Umdrehungen/min und war mit einem 80-Maschenmessingsieb (80 Maschen auf den Linearzoll) bespannt. Da schon einige Jahre vorher in dem gleichen Sichtertyp sich eine ähnliche Explosion ereignet hatte, welche man auf statische

Elektrizität, erzeugt durch Reibung der Dextrinteilchen an dem Sieb, zurückgeführt hatte, war der Sichter über die Rohre der Sprinkleranlage geerdet worden. Nach der Erdung fanden keine Explosionen mehr statt bis auf die eine im Jahre 1914. Erst kurze Zeit vor der letzten Explosion war die Erdleitung geprüft und gut befunden worden. Wenige Minuten vor der Explosion war jedoch das Lager frisch geölt worden. Das läßt den Schluß zu, daß ein dickes Häutchen von frischem Öl die Welle so umhüllt hat, daß sie vom Lager isoliert worden ist. Es konnten sich so die elektrostatischen Ladungen auf dem isolierten Sichter ansammeln und bei Überschreitung der Kapazität durch den Entladungsfunken den Staub im Sichter entzünden und zur Explosion bringen. Nach der letzten Explosion wurde an der Welle des Sichters ein geerdeter Schleifbürstenkontakt angebracht; außerdem wurden alle Metallteile des Sichters mit der Welle leitend verbunden. Seitdem sind sieben Jahre verfloßen und keine Explosion hat mehr stattgefunden. — In einem Stärkesichter des gleichen Werkes hat sich wenige Monate später auch eine Explosion ereignet. Es wurde festgestellt, daß die Erdleitung dieses Sichters kurze Zeit vor der Explosion unterbrochen worden war. Seit auch dieser Sichter mit dem Bürstenkontakt ausgerüstet ist, haben keine Explosionen mehr stattgefunden.

Der interessanteste Fall dürfte der folgende sein (25), schon aus dem Grunde, weil er wohl der einzige Fall ist, daß jemand nicht nur eine Explosion in einer Mühle hat stattfinden sehen, sondern daß er auch in der Lage war, Ursache und Begleitumstände der Explosion unmittelbar zu beobachten.

„Noch überzeugender ist die Erfahrung, welche das Werk der Sperry Flower Company in Stockton, Kalifornien, gesammelt hat. Innerhalb einer Woche fanden sieben Explosionen in einer Reibungsmühle (Attritionmill) statt, in der Haferschalen vermahlen wurden. Die meisten dieser Explosionen waren nicht besonders heftig, weil die Art der Wegbeförderung des Mehles aus der Mühle so eingerichtet war, daß das Mehl nach außen abgeführt wurde. In einem Fall jedoch wurde das Elevatorgestell schwer beschädigt und das Sicherheitsventilationsrohr sowie der Elevatorkopf wurden weggefegt. Es ist wahrscheinlich, daß dies zu einer verhängnisvollen Explosion geführt hätte, wenn die Mühle nicht gerade außerordentlich sauber gewesen wäre.

Die Reibungsmühle, in der die Explosion stattfand, war kugelgelagert und wurde durch einen unmittelbar angekuppelten Elektromotor angetrieben. Die in die Mühle eintretenden Haferschalen wurden durch einen Luftstrom von der Grütze getrennt: die schwerere Grütze fiel in einen Kasten, während die leichteren Schalen in eine Kammer geführt wurden,

aus der sie in die Mühle fielen. Diese Trennung unter Benützung der verschiedenen Schwere schließt die Möglichkeit aus, daß schwere Fremdkörper mit den Schalen fortgeführt wurden und so in die Mühle gelangten. Deshalb mußte man nach einer anderen Explosionsursache Umschau halten.

Der Müller glaubte, daß statische Elektrizität die Ursache wäre und er bemühte sich den Beweis dafür zu erbringen. Ein Goldblattelektroskop wurde verschafft und verschiedene Teile der eigentlichen Mühle wurden damit untersucht. Starke positive Ausschläge wurden vom Gestell bewirkt, doch kein einziger Auschlag von der Welle — der Müller hielt diese zwar für negative Ausschläge. Dies gab ihm einen Fingerzeig; da er aber unschlüssig war, schnitt er aus dem Gehäuse der Mühle ein Stück heraus und ersetzte es durch Glas, durch welches er das Innere der Mühle überwachen konnte. Im Augenblick der heftigsten Explosion beobachtete der Müller, wie Funken von den Mahlscheiben der Mühle wegsprangen. Die Funken kamen zuerst einzeln in Abständen, dann kontinuierlich. Als die Funken um den äußeren Rand der Mahlscheiben herumzusprühen schienen, fand die Explosion in der Mühle und am Elevatorfußgestell statt. Der Müller nahm besonders Kenntnis von der Farbe der Funken oder des „Feuers" und beschrieb sie als schwach blau, d. i. die charakteristische Farbe des Entladungsfunkens der statischen Elektrizität. Die Funken, die durch Reibung erzeugt werden, sind sehr verschiedenartig, sie können auch gelb sein; man kann sie aber unschwer als solche erkennen. Es wurden sofort Schritte unternommen, alle Reibungsmühlen des Werkes zu erden. Die Störungen hörten auf und keine Explosionen haben seitdem wieder stattgefunden."

In einer mir bekannten Brauerei kam es in der Mälzerei früher häufig zu Malzstaubexplosionen. Der Direktor Schröder, der damals die Explosionen in seiner Picherei durch Beseitigung der Riemenelektrizität zum Verschwinden gebracht hatte, spannte in dem malzstaubverseuchten Raum, in dem es bisher immer zu den Malzstaubexplosionen gekommen war, einen blanken Kupferdraht und verband ihn mit der Wasserleitung. Seitdem hörten auch diese Explosionen auf.

Unabhängig von den amerikanischen Forschern und ohne Kenntnis von deren ausgezeichneten Arbeiten mit dem umfangreichen Tatsachenmaterial — der Weltkrieg hatte die internationalen Verbindungen zerstört — ist Beyersdorfer (26) anläßlich seiner Untersuchungen über Zuckerstaubexplosionen zu der Erkenntnis gekommen, welch große Gefahr den stauberzeugenden Industrien durch die statische Elektrizität droht. Nachdem im Februar 1916 in der Raffinerie der Zuckerfabrik Frankenthal eine

katastrophale Zuckerstaubexplosion (7 Tote, 38 Verletzte) stattgefunden hatte, ereignete sich im Mai 1917 in der auf Grund der Erfahrungen der ersten Explosion modernst neu errichteten Mühlenanlage wiederum eine gleich folgenschwere Zuckerstaubexplosion. Der Herd dieser Explosion, welche sich unmittelbar nach einer Betriebspause ereignet hat, war in den von der eigentlichen Mühle etwa 60 m entfernt stehenden Vorbrechern (Backenquetschen). Die gründlichen Nachforschungen nach der Ursache dieser Explosion haben nicht den geringsten Anhaltspunkt dafür gebracht, daß die Explosion eine thermische Ursache gehabt haben könnte. Man gab schließlich der Vermutung Ausdruck, es könne eine kombinierte Gas-Staubexplosion gewesen sein. Das Gas — Methan — könne aus einem offen gewesenen Abwasserkanal in den Vorbrecherraum gelangt sein. Aber auch zum Auslösen einer Gas-Staubexplosion bedarf es einer Energiequelle. Welche ist es gewesen, wenn die Wärme wenig Wahrscheinlichkeit für sich hat? In den Backenquetschen konnten, wenn harter Zucker gebrochen wurde, bisweilen über 10 cm lange Tribolumineszenzfunken beobachtet werden. Dies ist schon ein Beweis für die Bildung lichtelektrischer Energie. Wie gering die Wahrscheinlichkeit ist, daß durch Fremdkörper in den genannten Backenquetschen ein ausreichender Wärmevorrat erreicht werden kann, zeigt folgender von Jaeckel und Beyersdorfer (27) angestellter Versuch an diesen Backenquetschen. Sie warfen eiförmige Metallstücke (bis zu 4 cm kleinem und 7 cm großem Durchmesser) ins Maul der leer laufenden Backenquetschen. Bis zu 3 cm kleinem Durchmesser fielen die Stücke ohne nennenswerte Deformierung sofort durch den Spalt. Nur die größten Stücke, zwei Messingstücke von ca. 4 cm kleinem Durchmesser, fielen nicht mehr durch. Nachdem die Stücke mehrere Minuten in der Maschine bearbeitet worden waren — bis zu 5 mm tiefe Kerben waren in verschiedenen Richtungen durch die Riffelungen der Backen hineingeschlagen —, zeigten die Metallstücke eine mit der Hand gerade fühlbare Erwärmung. Auch nach diesem Versuch hat die thermische Explosionsursache wenig Wahrscheinlichkeit für sich.

Da von acht bekannten katastrophalen Zuckerstaubexplosionen sich sieben unmittelbar nach Betriebsbeginn oder nach einer Betriebspause ereignet haben (bei der achten fehlt die Zeitangabe), da auch die Aluminiumstaubexplosion in Barmsdorf sich 90 sec nach Betriebsaufnahme ereignet hat, also unter Umständen, wo Heißlaufen von Lagern und Erhitzen größerer Metallmassen auf nahezu dunkle Rotglut wenig Wahrscheinlichkeit für sich haben, kam Beyersdorfer auf den Gedanken, die Explosionsursache könne eine elektrostatische sein. Außer den bereits mitgeteilten qualitativen und quantitativen Versuchen über die Elektrizitätserregung

durch Zuckerstaub stellte er noch folgenden Laboratoriumsversuch an mit der Absicht, eine elektrische Staubexplosion zu erzeugen. Als Vorbild diente ihm der Versuch von Nusselt (28). Um die Gasexplosionen, die sich wiederholt beim Füllen von Luftschiffen mit Wasserstoff aus Stahlflaschen ereignet haben, aufzuklären, hat Nusselt u. a. Wasserstoff, gemischt mit Eisenrost, aus Düsen ausströmen lassen und dabei festgestellt, daß die dabei erzeugte Reibungselektrizität den Wasserstoff zu entzünden vermag. Beyersdorfer (26) benutzte einen Trog, bestehend aus einem ausgehöhlten Eisenkern. Dieser wurde mit Zuckerstaub gefüllt und mit zwei halbkreisförmigen Stahlplatten verschlossen. Die Deckelplatten waren durch Auseinanderschneiden einer kreisrunden 1 cm starken Stahlplatte längs eines Durchmessers hergestellt worden. Die beiden Schnittflächen waren poliert, so daß bei deren Aneinanderlegen ein äußerst feiner Spalt entstand. Durch diesen Spalt wurde der Zuckerstaub durch Einleiten von Sauerstoff, der etwa unter 100 at Druck stand, hinausgetrieben. Der Trog war durch eine Verschraubung am Einblasrohr unmittelbar mit der Gasflasche verbunden. Wurde der Zuckerstaub mit Sauerstoff durch den Spalt geblasen, so leuchtete der Schlitz in seiner ganzen Ausdehnung in weißblauem Licht. Wurde über dem Schlitz in etwa 5 mm Entfernung ein geerdeter Kupferdrahtbügel angebracht, so war das Leuchten des Schlitzes überstrahlt von dem intensiven Leuchten des Drahtbügels. Zwischen Schlitz und Drahtbügel sah man rötlichgelbe Fünkchen überspringen. Bei einigen Versuchen wurden die Fünkchen vom Schlitz aus strahlenförmig hinausgeschleudert, so daß man sie oft in einer Strecke von über 5 cm leuchten sah, wie etwa die letzten Strahlen der untergehenden Sonne. Wurde über dem Schlitz ein Kupferblech, das um einen Kupferdraht zwecks Erdung umgebördelt war, so angebracht, daß es mit der unteren Kante in etwa 4 mm Abstand parallel zum Schlitz, ein wenig abseits von diesem, verlief und gegen die Deckelebene um etwa 70° so geneigt war, daß der ausströmende Staub unter einem sehr spitzen Winkel gegen das Blech fliegen mußte, so zeigte sich folgendes: Das Leuchten des Schlitzes erschien schwächer; die obere Kante des Bleches leuchtete etwa mit der Intensität des Bügels beim zweiten Versuch. Die ganze vom Zuckerstaub getroffene Fläche leuchtete in schwachem weißlichblauen Glimmlicht auf. Man hatte den Eindruck eines Flächenblitzes kleinsten Maßstabes. — Alle Leuchterscheinungen mit Ausnahme der schwach leuchtenden Fläche konnten mit einer gewöhnlichen Kamera photographiert werden.

Wurde statt Sauerstoff Stickstoff verwendet — das geschah, um festzustellen, ob die Leuchterscheinungen nicht etwa auf Tribolumineszenz zurückzuführen wären —, so waren die Leuchterscheinungen von gleicher

Intensität, aber nicht bläulichweiß, sondern violett. Die Leuchterscheinung ist also nicht dem Zucker, sondern dem Gas eigentümlich. Durch vergleichende spektralphotographische Aufnahmen dieser Leuchterscheinungen und des Leuchtens von Sauerstoff und Stickstoff im Wechselfeld eines Siemensozonisators (50 Perioden bei 8000 Volt) wurde objektiv die Identität der Leuchterscheinungen festgestellt. — Es steht also fest, daß durch Wirbeln von Zuckerstaub mit einem Gas so hohe elektrische Spannungen erzeugt werden können, daß deren Entladungen das Gas zum Leuchten bringen.

Da es bei diesen Versuchen nicht gelungen war, eine Staubexplosion zu erzeugen — die Abkühlung durch das unter so hohem Druck ausströmende Gas war zu groß —, wurde versucht, umgekehrt zu verfahren, da es an sich gleichgültig erschien, ob wirbelnder Zuckerstaub selbst die Elektrizität hervorruft oder ob man die sog. stillen Entladungen anderweitig erzeugt. Da aus Versuchen von Hemptinne (29) bekannt ist, daß durch elektrische Schwingungen großer Schnelligkeit gepulverter Zucker bis zu einem gewissen Grade zersetzt wird und da von der Zersetzung bis zur Explosion der Zersetzungsgase nur noch ein Schritt ist, wurde folgender Versuch angestellt: Ein wenig Zuckerstaub wurde in das von einem langsamen Sauerstoffstrom durchflossene Wechselfeld eines Siemensozonisators gebracht. Die Glasröhre des Ozonisators tauchte in Wasser von 30° C. Nach einigen Minuten wurde der Hochspannungsstrom abgestellt. Da erfolgte ein leichter Knall und ein gelbes Flämmchen leuchtete auf, dort, wo sich der Zucker befand, das ist unten, wo das Gas ins Wechselfeld eintritt. Die Röhre war an dieser Stelle intensiv gebräunt, im Knie des Zuführungsrohres war geschmolzener Zucker und aus der Röhre kam der typische Geruch verbrannten Zuckers. Wurde statt Sauerstoff Luft genommen, so waren nach dem Versuch die gleichen Verbrennungserscheinungen wahrnehmbar; jedoch wurde keine Flamme gesehen und keine Verpuffung gehört. Die Versuche waren nicht beliebig oft reproduzierbar. Beyersdorfer (26) gibt folgende Erklärung der Explosionserscheinung: „Die stillen Entladungen ozonisieren bekanntlich die Luft. Bei der Ozonisierung der Luft entsteht auch N_2O_5. Die Menge des N_2O_5 wurde quantitativ bestimmt ... Es wurden durch Titration 25 und 27 mg N_2O_5, entstanden aus 10 ℓ Luft, ermittelt ... Vergegenwärtigt man sich nach diesen Ausführungen, daß durch die stillen elektrischen Entladungen zwischen Zuckerstaub und Luft Ozon und N_2O_5 gebildet werden, daß diese so reaktionsfähigen Stoffe sich mit fast molekularem Zucker in inniger Mischung befinden unter der Einwirkung hoch gespannter elektrischer Ströme, denkt man weiter an die Analogien: Zellulose — Zucker; Nitrozellulose — Nitrozucker, dann werden die rätselhaften Staubexplosionen begreiflich sein".

Beyersdorfer hat — auch in Gemeinschaft mit Jaeckel — zahlreiche Messungen in Mühlenbetrieben wie auch an einer neuartigen Dreschmaschine gemacht und in allen Fällen auf dem gemahlenen Gute und an Maschinenteilen Spannungen bis zu mehreren tausend Volt festgestellt.

Bei einem Experimentalvortrag haben Jaeckel und Beyersdorfer durch ein etwa 1 m langes, isoliert schräg aufgestelltes Metallrohr, das mit einer Kapazität (Kleistscher Flasche) und einem Elektrometer leitend verbunden war, einige Kilogramm Zucker mit mäßiger Geschwindigkeit hindurchlaufen lassen und dabei so starke Aufladungen bekommen, die ausreichend sind, um die bekannte Vorlesungsknallgaskanone zum Abschuß zu bringen. Der durch das Rohr gelaufene Zucker zeigte die entgegengesetzte Ladung des Rohres. — Bei einem anderen Versuch wurde das Metallrohr geerdet und der Zucker mit einer Blechbüchse aufgefangen, die einem Elektroskop aufgesetzt war. Das Elektroskop schlug dennoch kräftig aus. Dieser Versuch lehrt, daß selbst durch Erdung von Maschinenteilen, wenn das Mahlgut ein Isolator wie Zucker ist, die durch die statische Elektrizität drohende Gefahr immer noch nicht ganz behoben ist.

Georg Jaeckel (5) verdanken wir die theoretische Untersuchung darüber, ob eine Staubexplosion durch elektrostatische Zündung überhaupt möglich ist. Jaeckels Rechnungen bauen sich auf folgender rein energetischen Betrachtung auf: Zur Entzündung des Staubes gehört eine bestimmte Energie, die aus der Menge, der spezifischen Wärme und der Entzündungstemperatur des Staubes berechenbar ist. Zur Einleitung der Explosion muß diese Energie auf irgendeine Weise aufgebracht werden. Soll nun die Explosion allein durch die elektrische Aufladung des Staubes verursacht werden, so muß — ganz gleichgültig, welche Zwischenvorgänge sich abspielen — die in der Staubwolke enthaltene elektrische Energie gleich sein der zur Entzündung der Staubwolke notwendigen Wärmeenergie. Die theoretische Behandlung des Problems läuft darum hinaus auf die Berechnung der genannten Energien und die Gewinnung von meßbaren Größen, welche eine experimentelle Prüfung der Theorie und der Hypothese der elektrischen Staubexplosion gestatten.

a) Berechnung der in einer gleichmäßig elektrisch geladenen Staubwolke enthaltenen elektrischen Energie.

Angenommen, die Staubwolke habe die Gestalt einer Kugel vom Radius R, alle Staubteilchen seien gleichartig geladen — was sie in Wirklichkeit auch sind — und die Ladung sei innerhalb der Kugel gleichmäßig

verteilt. Die Ladung/cm³ = Ladungsdichte sei k. Die Gesamtladung der Staubwolke ist dann

$$E = \frac{4}{3} \cdot R^3 \cdot \pi \cdot k . \qquad (8)$$

Die gleichmäßige Verteilung der Ladung ist selbstverständlich nur ein Übergangszustand; denn sobald diese Staubwolke in ein Gefäß eingeschlossen und sich selbst überlassen wird, bedingen die zwischen den Staubteilchen wirksamen Abstoßungskräfte ein heftiges Auseinanderströmen der Teilchen nach der Gefäßwand hin, dann ein Niederschlagen der Teilchen und eine Umsetzung eines Teils der in der Wolke enthaltenen elektrischen Energie in eine andere Energieform.

Die in der Staubwolke ruhende elektrische Energie erhält man durch folgende Überlegung: Sie muß gleich sein der Arbeit, die nötig ist, um die elektrisch geladenen Partikelchen mit der Gesamtladung E gegen die elektrischen Abstoßungskräfte aus dem Zustand feinster Verteilung über den unendlichen Raum auf eine Kugel vom Radius R zu verdichten. Diese Arbeit kann nur abhängig sein vom Anfangs- und Endzustand. Es ist daher ganz gleichgültig, auf welche Weise man sich die Verdichtung der Gesamtladung E aus dem Zustande unendlich feiner Verteilung auf die Dichte k entstanden denkt. Es ist rechnerisch am einfachsten, wenn man sich die Kugel in konzentrische Kugelschalen vom Radius r und der Dicke dr zerlegt denkt und sich die Verdichtung der ganzen Kugel so vorstellt, daß das Zentrum der Kugel zuerst entstanden sei und daß dieser kugelförmige Kern vom Radius r und der Ladungsdichte k durch allmähliche Verdichtung weiterer Staubmassen um eine Kugelschale der Dicke dr und der Ladungsdichte k vergrößert werde usf. usf. dA sei die Arbeit, die aufzuwenden ist, um eine solche Kugelschale aus dem Unendlichen auf den Abstand r heranzubringen.

Da die Ladung des kugelförmigen Kernes

$$e_1 = \frac{4}{3} \cdot r^3 \cdot \pi \cdot k$$

und die Ladung der Kugelschale

$$e_2 = 4 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot dr \cdot k ,$$

so ist — da die gleichmäßig geladene Kugel nach außen so wirkt, als ob ihre Ladung im Mittelpunkte vereinigt wäre — die bei dem Heranführen der Kugelschale geleistete Arbeit nach dem Coulombschen Gesetz

$$dA = \frac{e_1 \cdot e_2}{r} = \frac{16}{3} \pi^2 \cdot k^2 \cdot r^4 \cdot dr ,$$

also die Gesamtarbeit bei der Entstehung der ganzen Kugel vom Radius R:

$$A = \int_{r=0}^{r=R} dA = \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot k^2}{3} \cdot \int_{r=0}^{r=R} r^4 \cdot dr = \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot k^2 \cdot R^5}{15}$$

$$A = \frac{16 \cdot \pi^2}{15} \cdot k^2 \cdot R^5 . \tag{9}$$

Führt man nach (8) die Gesamtladung E ein, so nimmt der Ausdruck die Form an:

$$A = \frac{3}{5} \cdot \frac{E^2}{R} , \tag{10}$$

das ist also die Arbeit, die zur Verdichtung der Staubwolke nötig ist, und daher auch die potentielle Energie, die in der Staubwolke schlummert.

Würde die gleichmäßig geladene Staubwolke in eine leitende Hohlkugel vom Radius R eingeschlossen, so würden die gegenseitigen Abstoßungskräfte die Staubteilchen auseinander treiben und auf der Innenwandung niederschlagen. Hierbei wird ein Teil der elektrischen Energie in Arbeit und letzten Endes in Wärme umgesetzt. Den verbleibenden Rest an potentieller Energie, den die auf der Kugel vom Radius R gleichmäßig verteilte Ladung E besitzt, erhält man unmittelbar, wenn man über die Elementararbeiten integriert, die beim Heranführen der Ladung de aus dem Unendlichen auf die Kugel zu leisten sind, wenn auf dieser die Ladung gleichmäßig verteilt sein soll.

Die Teilarbeit ist dann

$$dA' = \frac{e \cdot dr}{R} ,$$

also

$$A' = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{R} .$$

So groß muß also nach dem Energieprinzip auch die potentielle elektrische Energie der auf der Kugeloberfläche gleichmäßig verteilten elektrischen Ladung sein. Sie ist also nur um $^1/_6$ kleiner als die Energie bei gleichmäßiger Raumerfüllung.

Nimmt man an, daß die betrachtete homogene Staubwolke jetzt von einer geerdeten leitenden Kugelfläche vom Radius R eingeschlossen sei, also nunmehr das Potential O habe, und denkt man sich die homogene Staubwolke wieder — wie oben beschrieben — entstanden, so ist die Teilarbeit beim Heranführen der Ladung e_2 von R nach r:

$$dA'' = e_2 \cdot e_1 \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right),$$

und man erhält anstatt (10):

$$A'' = \frac{1}{10} \cdot \frac{E^2}{R}.$$

Der elektrische Energieinhalt und damit die Gefahr der elektrischen Selbstentzündung einer kugelförmigen Staubwolke wird also durch Erdung der Wandung auf $^1/_6$ verringert.

b) Der elektrostatische Druck der Staubwolke.

Die elektrisch geladene Staubwolke ist wegen der gegenseitigen Abstoßung ihrer Bestandteile bestrebt, sich aufzulösen. Sie würde gegen eine sie umschließende Hülle einen Druck ausüben wie ein komprimiertes Gas. Dieser Druck sei der „elektrostatische Druck" P. Zur Berechnung dieses Druckes wird die Arbeit, die bei einer weiteren Komprimierung der Kugel um das Volumen

$$dV = 4\pi \cdot R^2 \cdot dR$$

unter Beibehaltung der Gesamtladung E erforderlich ist, auf zweierlei Weise ausgedrückt. Diese Arbeit ist einmal

$$dA = -P \cdot dV = -P \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot dR,$$

zum andernmal nach (10) — durch Differenzieren nach dR —

$$dA = -\frac{3}{5} \cdot \frac{E^2}{R^2} \cdot dR,$$

folglich ist:

$$P \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot dR = \frac{3}{5} \cdot \frac{E^2}{R^2} \cdot dR$$

oder

$$P = \frac{3E^2}{20\pi \cdot R^4}. \tag{11}$$

Ersetzt man hierin E durch den Wert der Gleichung (8), so wird

$$P = \frac{4\pi}{15} \cdot R^2 \cdot k^2. \tag{12}$$

c) Die zur Entzündung der Staubwolke nötige Energie.

Es sei die naheliegende Annahme gemacht, daß zur Einleitung des Explosionsvorganges bei der elektrischen Staubexplosion dieselbe Energie aufgewendet werden muß wie bei der thermischen Staubexplosion, bei

welcher die ganze Staubwolke auf Entzündungstemperatur gebracht werden muß. Wenn

$$\left.\begin{aligned} s_1 &= \text{Dichte der Luft,}\\ c_1 &= \text{spezifische Wärme der Luft,}\\ c_2 &= \text{spezifische Wärme des Staubes,}\\ p &= \text{Konzentration des Staubes in g/cm}^3\\ \Delta T &= \text{Temperaturerhöhung,}\\ Q &= \Delta T \cdot (s_1 \cdot c_1 + p \cdot c_2) \text{ [siehe Gl. (1)],}\\ a &= \text{mechanisches Wärmeäquivalent} = 4{,}2 \cdot 10^7 \text{ erg/cal,} \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

dann ist die zur Entzündung der kugelförmigen Staubwolke erforderliche Energie

$$W = \frac{4\pi}{3} \cdot R^3 \cdot Q \text{ cal} = \frac{4\pi}{3} \cdot R^3 \cdot Q \cdot a \text{ erg}. \quad (14)$$

d) Die Grundbedingung der elektrischen Staubexplosion.

Wenn die elektrostatische Aufladung der Staubteilchen allein die zur Entzündung der Staubwolke notwendige Energie darstellen soll, dann muß die potentielle elektrische Energie der Staubwolke gleich oder größer sein als die zur Einleitung der Entzündung notwendige Energie.

$$A \geqq W \quad (15)$$

ist die Explosionsbedingung. Jede Staubwolke oder jeder Teil einer Staubwolke, für den sie erfüllt ist, kann sich selbst entzünden.

Es ist gleichgültig, ob die elektrische Energie sich direkt in Wärme oder vorher erst in eine andere Energieform umsetzt. Z. B. können sich die Staubteilchen zunächst infolge der Abstoßungskräfte in Bewegung setzen, dabei elektrische Energie verlieren und Bewegungsenergie gewinnen. Die kinetische Energie kann bei Aufprall der Teilchen auf die Wandungen in Wärme umgesetzt werden. Die Entzündung kann aber auch so zustande kommen: An den Wandungen, die den Staub erzeugenden Teilchen einer Maschine benachbart sind, setzt sich allmählich viel geladener Staub ab. Immer neu geladene Staubteilchen werden durch die vom Zentrum her wirkenden Abstoßungskräfte darauf geschleudert. Auf diese Weise werden immer größere Elektrizitätsmengen angehäuft. Diese können eine stille Entladung hervorrufen, die von der obersten Staubschicht durch die gut isolierenden inneren Staubschichten nach der metallenen Wand hindurch geht und die ihr ausgesetzten Staubschichten genau so entzünden kann, wie die von einer fremden Energiequelle unterhaltene stille Entladung bei dem Ozonisatorversuch Beyersdorfers den ruhenden Zuckerstaub entflammt hat.

Wie man sich auch den Explosionsvorgang vorstellen mag, immer muß die ursprüngliche potentielle elektrische Energie der Staubwolke größer sein als die zu ihrer Entzündung benötigte Wärmeenergie.

e) Die zur Selbstentzündung notwendige elektrische Aufladung der Staubteilchen.

Die hierfür notwendigen Bedingungsgleichungen erhält man durch Einsetzen der Werte (9) und (14) in (15):

$$\left.\begin{aligned} \frac{16\,\pi^2}{15}\cdot k^2\cdot R^5 &\geqq \frac{4\,\pi}{3}\cdot R^3\cdot a\cdot Q\,, \\ \frac{4\,\pi}{15}\cdot k^2\cdot R^2 &\geqq \frac{1}{3}\cdot a\cdot Q\,. \end{aligned}\right\} \qquad (16)$$

Führt man nach (12) den elektrostatischen Druck der Staubwolke P ein, so erhält man

$$P \geqq \frac{1}{3}\cdot a\cdot Q\,. \qquad (17)$$

Da Q lediglich durch die thermischen Konstanten des Staub-Luftgemisches bestimmt wird, ist der zur Selbstentzündung führende elektrostatische Druck unabhängig von der Größe der Staubwolke. P kann sogar als Konstante betrachtet werden, solange die Staubkonzentration so gering ist, daß die Wärmekapazität des Staubes klein ist gegen die der Luft. (Bei Zuckerstaub etwa bis zur Konzentration 20 g/m³.)

Aus (16) erhält man die geringste für die Selbstentzündung erforderliche räumliche Ladungsdichte der Staubwolke zu

$$k = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{15}{4\,\pi}\cdot P} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{5}{4\,\pi}\cdot a\cdot Q}\,. \qquad (18)$$

Da P nahezu konstant ist, sagt Gleichung (18) aus: Je größer der Radius der Staubwolke ist, um so kleiner braucht die elektrische Ladung/cm³ zu sein, um Selbstentzündung zu ermöglichen.

Bezeichnet

K die Ladung/g Staub, (19)

so ist, da

k = Ladung/cm³ und

p = Staubkonzentration in g/cm³,

$$k = p\cdot K \qquad (20)$$

oder unter Benutzung des k-Wertes nach (18)

$$K = \frac{1}{R \cdot p} \cdot \sqrt{\frac{5}{4\pi} \cdot a \cdot Q}\,, \tag{21}$$

d. h. je größer die Staubkonzentration ist, eine um so geringere Ladung/g genügt zur Selbstentzündung.

Dagegen gibt es für die elektrische Staubexplosion, wenn man nur die Energie berücksichtigt, keine untere oder obere Sicherheitsgrenze in der Konzentration des Staubes. Bei sehr geringen Staubkonzentrationen ist allerdings eine sehr hohe Aufladung/g erforderlich, die praktisch kaum erreichbar sein dürfte.

Nach den entwickelten Gleichungen ist nur eine bestimmte Ladung/g für die Explosion erforderlich. Über die Teilchengröße wird nichts ausgesagt. Diese Unabhängigkeit von der Teilchengröße ist aber nur scheinbar. Das mit dem Kleinerwerden der Teilchen anwachsende Verhältnis Oberfläche: Masse gestattet eine stärkere Aufladung der Teilchen durch Reibung.

f) Prüfung der Theorie an der Erfahrung.

Für das Beispiel des Zuckers ist die Ladung/g Staub experimentell ermittelt worden zu

$$K = 8{,}5 \cdot 10^4 \text{ el. stat. Einh./g (S. 10)}\,.$$

Wird in Gleichung (21) der Wert für Q aus (13) eingesetzt, so wird

$$K = \frac{1}{p \cdot R} \sqrt{\frac{5\,a\,\Delta\,T}{4\pi} \cdot (s_1 \cdot c_1 + p \cdot c_2)}\,.$$

Durch Einsetzen der Zahlenwerte von S. 53 u. 55 erhält man die spezielle Bedingungsgleichung für Zuckerstaub-Luftgemische:

$$K = \frac{10^3}{p \cdot R} \sqrt{1{,}42 + 2340\,p} \cdot \frac{\text{cm}^{\frac{3}{2}}\,\text{g}^{\frac{1}{2}}\,\text{sec}^{-1}}{\text{g}}\,. \tag{22}$$

Die für Zuckerstaub gemessene Aufladung/g reicht nach dieser Bedingungsgleichung sehr wohl aus zur Auslösung von Zuckerstaubexplosionen.

Setzt man in Gleichung (22) $K = 8{,}5 \cdot 10^4$, so findet man, daß die zur Explosion ausreichende Staubkonzentration beträgt

157 g/m³ bei einem Radius der Staubwolke von 100 cm,
273 g/m³ „ „ „ „ „ „ 62 cm,
und 3250 g/m³ „ „ „ „ „ „ 10 cm.

Das sind Konzentrationen, wie sie in den Zerkleinerungsmaschinen, namentlich am Ort der eigentlichen Zerkleinerung, wo der naszierende Staub anfällt, keine Seltenheit sind.

Beyersdorfer (30) hat, um die durch den elektrisch geladenen Staub drohende Gefahr im richtigen Lichte erscheinen zu lassen, d. h. um sie nicht größer erscheinen zu lassen als sie tatsächlich ist, unter Auswertung der Jaeckelschen Bedingungsgleichung (22) für Zuckerstaub eine schematische tabellarische Übersicht entworfen. Tabelle XI soll für die möglichen Größenordnungen des Staubes zeigen, bei welcher Konzentration für jede bestimmte Größenordnung unter der experimentell begründeten Annahme, daß jedes Staubteilchen 10^2 Elektronen trage, noch Explosionsgefahr besteht. Die Explosionsgefahr besteht, wenn die in Spalte 10 angegebene Zahl $\geqq 1$ ist.

Spalte 1 enthält die Durchmesser der Staubteilchen (d) in Zentimeter. Es wurde mit $d = 10^{-7}$ cm begonnen, weil von dieser Größe etwa der Durchmesser eines kugelförmig gedachten Zuckermoleküls sein dürfte.

Spalte 2 gibt das Gewicht eines Staubteilchens (m) in Gramm an unter Annahme der Kugelform und des spezifischen Gewichtes $s = 1{,}6$ g/cm³.

Spalte 3 enthält die Staubkonzentration (p) in g/m³.

Spalte 4 gibt die Zahl der Staubteilchen (n) im Kubikmeter an; (n) ist gleich der Zahl der Elektronen im Kubikmeter, wenn jedes Teilchen ein Elektron trägt.

Spalte 5 und 6 geben die im Kubikmeter bzw. Gramm vorhandenen elektrostatischen Einheiten an unter der Annahme, daß jedes Teilchen ein Elektron trägt.

Spalte 7 und 8 geben die nach der Bedingungsgleichung im Gramm bzw. Kubikmeter zur Explosion erforderlichen elektrostatischen Einheiten an.

Spalte 9 und 10 bringen zum Ausdruck, ob in der Wolke die zur Explosion erforderliche Energie tatsächlich vorhanden ist, wenn jedes Staubteilchen 1 bzw. 10^2 Elektronen trägt.

Man sieht aus der Tabelle, daß der wirklich kolloide Staub bis zur Größenordnung 10^{-5} cm bei allen praktischen Konzentrationen gefährlich ist. Staub der Größenordnung 10^{-4} cm wird erst bei Konzentrationen von 500 g/m³ an aufwärts gefährlich. Da solche Konzentrationen im Augenblick des Zerkleinerns und unmittelbar nachher vorhanden sind, ist auch solcher Staub noch als gefährlich anzusprechen. Staub der Größenordnung 10^{-3} cm hingegen bedeutet für die elektrische Staubexplosion überhaupt keine Gefahr mehr; denn eine Konzentration von mehr als 10^8 g/m³, ober-

Tabelle XI.

Elektrische Ladung und Teilchengröße.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	d cm	m g	p g/m³	n	el.stat.Einh./m³	el.stat.Einh./g	K/g	K/m³	$\frac{(6)}{(7)} = \frac{(5)}{(8)}$	(9) · 10²
1	10^{-7}	$8{,}4 \cdot 10^{-22}$	10^{-6}	$1{,}2 \cdot 10^{15}$	$5{,}7 \cdot 10^{5}$	$5{,}7 \cdot 10^{11}$	$1{,}9 \cdot 10^{13}$	$1{,}9 \cdot 10^{7}$	$3 \cdot 10^{-2}$	3
2			10^{-5}	$1{,}2 \cdot 10^{16}$	$5{,}7 \cdot 10^{6}$	$5{,}7 \cdot 10^{11}$	$1{,}9 \cdot 10^{12}$	$1{,}9 \cdot 10^{7}$	$3 \cdot 10^{-1}$	3 · 10
3			10^{-4}	$1{,}2 \cdot 10^{17}$	$5{,}7 \cdot 10^{7}$	$5{,}7 \cdot 10^{11}$	$1{,}9 \cdot 10^{11}$	$1{,}9 \cdot 10^{7}$	3	3 · 10²
4	10^{-6}	$8{,}4 \cdot 10^{-19}$	10^{-3}	$1{,}2 \cdot 10^{15}$	$5{,}7 \cdot 10^{5}$	$5{,}7 \cdot 10^{8}$	$1{,}9 \cdot 10^{10}$	$1{,}9 \cdot 10^{7}$	$3 \cdot 10^{-2}$	3
5			10^{-2}	$1{,}2 \cdot 10^{16}$	$5{,}7 \cdot 10^{6}$	$5{,}7 \cdot 10^{8}$	$1{,}9 \cdot 10^{9}$	$1{,}9 \cdot 10^{7}$	$3 \cdot 10^{-1}$	3 · 10
6			10^{-1}	$1{,}2 \cdot 10^{17}$	$5{,}7 \cdot 10^{7}$	$5{,}7 \cdot 10^{8}$	$1{,}9 \cdot 10^{8}$	$1{,}9 \cdot 10^{7}$	3	3 · 10²
7	10^{-5}	$8{,}4 \cdot 10^{-16}$	10^{0}	$1{,}2 \cdot 10^{15}$	$5{,}7 \cdot 10^{5}$	$5{,}7 \cdot 10^{5}$	$1{,}9 \cdot 10^{7}$	$1{,}9 \cdot 10^{7}$	$3 \cdot 10^{-2}$	3
8			10	$1{,}2 \cdot 10^{16}$	$5{,}7 \cdot 10^{6}$	$5{,}7 \cdot 10^{5}$	$1{,}9 \cdot 10^{6}$	$1{,}9 \cdot 10^{7}$	$3 \cdot 10^{-1}$	3 · 10
9			10^{2}	$1{,}2 \cdot 10^{17}$	$5{,}7 \cdot 10^{7}$	$5{,}7 \cdot 10^{5}$	$2{,}1 \cdot 10^{5}$	$2{,}1 \cdot 10^{7}$	2,7	27 · 10
10	10^{-4}	$8{,}4 \cdot 10^{-13}$	10^{2}	$1{,}2 \cdot 10^{14}$	$5{,}7 \cdot 10^{4}$	$5{,}7 \cdot 10^{2}$	$2{,}8 \cdot 10^{5}$	$2{,}8 \cdot 10^{7}$	$2{,}0 \cdot 10^{-3}$	0,2
11			$5 \cdot 10^{2}$	$6{,}0 \cdot 10^{14}$	$28{,}6 \cdot 10^{4}$	$5{,}7 \cdot 10^{2}$	$5{,}2 \cdot 10^{4}$	$2{,}6 \cdot 10^{7}$	$1{,}1 \cdot 10^{-2}$	1,1
12			10^{3}	$1{,}2 \cdot 10^{15}$	$5{,}7 \cdot 10^{5}$	$5{,}7 \cdot 10^{2}$	$3{,}1 \cdot 10^{4}$	$3{,}1 \cdot 10^{7}$	$1{,}9 \cdot 10^{-2}$	1,9
13			10^{4}	$1{,}2 \cdot 10^{16}$	$5{,}7 \cdot 10^{6}$	$5{,}7 \cdot 10^{2}$	$8{,}0 \cdot 10^{3}$	$8{,}0 \cdot 10^{7}$	$7{,}1 \cdot 10^{-2}$	7,1
14	10^{-3}	$8{,}4 \cdot 10^{-10}$	10^{8}	$1{,}2 \cdot 10^{17}$	$5{,}7 \cdot 10^{7}$	$5{,}7 \cdot 10^{-1}$	8,0 · 10	$8{,}0 \cdot 10^{9}$	$0{,}7 \cdot 10^{-2}$	0,7

halb welcher erst der Energieinhalt ausreichend wäre, entbehrt jeglichen praktischen Sinnes.

Nur der allerfeinste Staub aus der Welt der vernachlässigten Dimensionen kann durch seine Eigenladung zur elektrischen Staubexplosion führen. Hierdurch erklärt sich auch die Häufigkeit der Dreschmaschinenexplosionen in Amerika, sobald brandiger Weizen gedroschen wird. Die Brandsporen gehören tatsächlich ihrer Größenordnung nach der Welt der vernachlässigten Dimensionen an. Sie befinden sich in kleinen Beutelchen. Beim Dreschen zerspringt die Hülle und in höchster Konzentration fliegt der Sporenstaub, durch Reibung an seiner Hülle oder an Maschinenteilen elektrisch geworden, hinaus. Die notwendig vorhandene große elektrische Ladungsdichte muß bei günstigen atmosphärischen Bedingungen zur Staubexplosion führen.

Die abnorm niedrigen Staubkonzentrationen des allerfeinsten Staubes, bei welchen bereits eine Explosion theoretisch möglich ist, gewinnen erst an Bedeutung durch die folgende, von Jaeckel (5) angestellte Überlegung. Bei dem S. 68 erwähnten Voltaschen Kondensatorversuch wurde durch Entfernung zweier isolierter, entgegengesetzt geladener Platten voneinander Arbeit gegen die elektrischen Anziehungskräfte geleistet, die Kapazität des Kondensators verkleinert und seine elektrische Energie und Spannung vergrößert. Entsprechend muß auch durch Nähern zweier gleichartig geladener Platten oder durch Komprimierung einer Wolke gleichartig geladener Teilchen eine Spannungserhöhung und eine Anhäufung elektrischer Energie eintreten. Es ist sonach sehr wohl möglich, daß die Druckwelle einer Explosion in entfernten Teilen des Raumes, in denen geladene Teilchen schweben, durch plötzliche Komprimierung der Staubwolke derartige elektrische Energien auf engem Raum anhäuft, daß auch dort eine Entzündung eintritt. Wie also allein durch adiabatische Kompression eine thermische Staubexplosion ausgelöst werden kann, so kann es auch durch gewöhnliche plötzliche Kompression einer Wolke elektrisch geladener Staubteilchen zur Explosion kommen. Bei Vorhandensein elektrisch geladener Staubteilchen kann eine Ausbreitung von Staubexplosionen von einem Raum zum andern stattfinden, ohne daß eine Flamme hindurch geschlagen ist.

Literatur.

1) R. Weber: Verh. Ver. Beförderung Gewerbefleiß 1878, S. 94.
2) U. S. Department of Agriculture, Bull., 681.
3) Dust Expl., S. 82.
4) Gg. Jaeckel u. P. Beyersdorfer: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 73 (1923), S. 138.

5) Gg. Jaeckel: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 73 (1923), S. 124. — Ztschr. techn. Phys. 5 (1924), S. 71.
6) Dust Expl., S. 74.
7) E. v. Schwarz: Handb. d. Feuers- u. Explosionsgefahr., III. Aufl. (1922), S. 232.
8) Dust Expl., S. 77.
9) L. Wöhler: Ztschr. angew. Chem. 31 (1918), S. 192.
10) P. W. Edwards: Paper Trade Journal v. 17. Jan. 1924.
11) l. c. 7, S. 252.
12) Dennstedt u. Mitarbeiter: Ztschr. angew. Chem. 1908, S. 160 u. S. 1825; 1912, S. 2625.
13) W. A. Noel: Chem. Metallurg. Eng. 31 (1924), Nr. 6.
14) H. Stockmeier: Beilg. Ber. Bayr. Gewerbemuseums 1904, S. 5.
15) Bunte u. Eitner: Allg. Brauer- u. Hopfenztg. 1907, Nr. 237.
16) M. M. Richter: Chem. Ztg. 1907, S. 1255.
17) Dust Expl., S. 146.
18) M. M. Richter: Chem. Ztg. 1906, S. 324.
19) H. Stockmeier: Chem. Ztg. 1906, S. 385.
20) O. Edelmann: Chem. Ztg. 1906, S. 925 u. S. 951.
21) M. M. Richter: Chem. Ztg. 1908, S. 136.
22) Dust Expl., S. 141.
23) Dust Expl., S. 144.
24) Dust Expl., S. 152.
25) Dust Expl., S. 156.
26) P. Beyersdorfer: Ber. Dtsch. Chem. Ges. 55 (1922), S. 2582. — Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 72 (1922), S. 502.
27) l. c. 4, S. 140.
28) Nusselt: Ztschr. Ver. Dtsch. Ingenieure 66 (1922), S. 203.
29) Hemptinne: Ztschr. Phys. Chem. 22, S. 372.
30) P. Beyersdorfer: Kolloid Ztschr. 33 (1923), S. 104.

VI. Staubexplosionen – Gasexplosionen.

Der Gedanke, daß Staub unter gewissen Bedingungen explodieren könne, brach sich — namentlich bei den Praktikern — nur langsam Bahn. Als 1858 in der Stettiner Walzenmühle die Explosion stattgefunden hatte, sprachen die einen (1) die Entzündung alkoholischer Dünste, die sich in der Dunstabzugsröhre aus dem gärenden Kleister gebildet haben sollten, als die Ursache an, andere (2) glaubten, daß bei der fauligen Zersetzung des Kleisters sich Sumpfgas gebildet habe, das durch Annäherung von Feuer oder durch Funken entzündet worden sei. An eine Explosion des Mehlstaubes wollte niemand glauben, bis 1878 Prof. Weber (3) den Beweis erbracht hat, daß 1. die vermeintlichen Gärungsgase nicht brennbar sind, 2. Mehlstaub sehr wohl explosibel ist.

Häufig, wenn man sich die Ursache einer Staubexplosion auf Grund der Ermittlungen nach derselben nicht erklären konnte, suchte man nach einem brennbaren Gas, welches die erste Ursache der Explosion hätte sein können. Als man für die in Frankenthal im Mai 1917 stattgefundene Zuckerstaubexplosion anläßlich der gründlichen Kommissionsuntersuchungen (4) nichts finden konnte, wodurch der Staub hätte gezündet werden können, verfiel man auf den Gedanken, die Entzündung von Gasen aus einem Kloakenkanal, der in der Nähe des Explosionsherdes lief, als erste Ursache anzusprechen.

Auch die ersten Explosionen in den Braunkohlenbrikettfabriken wollte man ursprünglich auf die Explosion von Gasen zurückführen, die beim Trocknen der Braunkohle in den Trockenöfen entstanden sein sollten, bis Holtzwart und v. Meyer (5) nachgewiesen haben, daß diese Gase in der Regel nur Spuren eines brennbaren Gases, nämlich Kohlenoxydgas, enthalten, im übrigen aber aus den Bestandteilen der Luft und etwas Kohlensäure bestehen und daß die eigentliche Explosionsursache der Braunkohlenstaub selbst ist.

Der erste, der erkannt hat, daß ein Staub explosibel ist, dürfte Michael Faraday (6) gewesen sein, der die Heftigkeit der 1844 in England erfolgten Kohlenbergwerksexplosion auf die Mitexplosion von durch die primäre Schlagwetterexplosion aufgewirbelten Kohlenstaub zurückgeführt hat.

Nach einer Explosion in einem Kohlenbergwerk wird es in der Regel schwer sein, zu entscheiden, ob es sich gehandelt hat 1. um eine reine Schlagwetter-, also Gasexplosion, 2. um eine kombinierte Schlagwetter-Kohlenstaubexplosion und 3. um eine reine Kohlenstaubexplosion. Eine Schlagwetterexplosion wird häufig die Mitexplosion von Kohlenstaub veranlassen. Die kombinierte Schlagwetter-Kohlenstaubexplosion ist vielleicht die häufigste. Aus Englers (7) Untersuchungen, deren Ergebnisse neuerdings durch amerikanische bestätigt worden sind, wissen wir, daß Gas-Luftmischungen, die an sich nicht explosibel sind, durch Beimengung von brennbarem Staub, der auch nicht einmal explosibel zu sein braucht, zur Explosion gebracht werden können. In diesem eigenartigen Verhalten von Gas-Staub-Luftgemischen liegt eine besondere nicht zu unterschätzende Gefahr. Da bekanntlich Kohle, je mehr sie sich dem Anthrazit nähert, je kohlenstoffreicher sie also ist, um so weniger explosionsgefährlich wird, darf angenommen werden, daß das Grubengas in an sich ungefährlichen Konzentrationen häufiger, als gemeinhin geglaubt, zum Verhängnis wird. Es sei in diesem Zusammenhang nur daran erinnert, daß Engler nicht explosiblen Ruß bzw. Holzkohlenstaub durch Beimengung von 2½% Grubengas zur Luft zur Explosion bringen konnte (S. 24).

Auch bei den Metallstaub-, Aluminium- und Magnesiumstaubexplosionen dürfte ein brennbares Gas — Wasserstoff — eine entscheidende Rolle spielen. Die genannten fein verteilten Metalle haben bekanntlich die Fähigkeit, Wasser bereits bei gewöhnlicher Temperatur, sicher aber bei 30° C, zu zersetzen unter Bildung von Metallhydroxyd und Wasserstoff. Stockmeier (8) hat nachgewiesen, daß Aluminiumbronze bei der Innentemperatur der Mühle (31—37° C) mit der ihr eigenen hygroskopischen Feuchtigkeit so viel Wasserstoff bilden kann, daß ein explosibles Wasserstoff-Luftgemisch entsteht. Solche Gemische können bereits durch Funken — Wärmequellen geringer Kapazität — entzündet werden. Richter (9) bezweifelt zwar die praktische Bildungsmöglichkeit gefährlicher Wasserstoffmengen. Immerhin dürfte die durch Wasserstoff drohende Gefahr nicht von der Hand zu weisen sein. Stockmeiers und Richters Untersuchungen sind nicht darauf ausgedehnt worden, inwiefern Wasserstoff in Konzentrationen unterhalb seiner unteren Explosionsgrenze mit Aluminumstaub gemischt im Sinne der Englerschen Arbeiten zur Explosion führen kann. Hier ist noch eine Lücke.

Nach dem eben Erörterten könnte man meinen, es soll ein gewichtiger Unterschied zwischen einer Staub- und einer Gasexplosion gemacht werden. Ein solcher Unterschied, richtiger eine scharfe Trennungslinie, ist aber nicht vorhanden. Auch eine reine Staubexplosion ist letzten Endes eine Gasexplosion, wenigstens in allen Fällen, in denen es sich um organische Stäube handelt.

Schon eine rein physikalische Betrachtung zeigt, daß vom Gas zum Staub ein kontinuierlicher Übergang besteht. Im Gas haben wir einzelne Moleküle, es ist molekulardispers. Im Staub haben wir Molekülaggregate, er ist kolloiddispers. Mit zunehmender Feinheit nähert sich der Staub dem reaktions-, also auch oxydationsfähigerem molekulardispersen Zustand. In diesem Sinne haben wir einen kontinuierlichen Übergang vom Gas zum selbst gröberen Staub.

Aber auch dem zeitlichen Reaktionsverlauf nach ist die Explosion eines organischen Staubes schließlich eine Gasexplosion. Den experimentellen Nachweis dafür hat Beyersdorfer (10) erbracht. Bei allen seinen Versuchen zur Ermittlung der Entzündungstemperatur des Zuckerstaubes in Luft, bei denen gerade keine Entzündung eintrat, hat er folgende Beobachtung gemacht. Mit dem Einblasen des Zuckerstaubes (ca. 80 mg) fiel die Temperatur sehr rasch um 10—15° C im Verlauf von 10—15 sec., um dann im Verlauf von weiteren ca. 30 sec. in der Regel über die Ausgangstemperatur — bis um 4° C — hinauszusteigen. Beyersdorfers Messungsergebnisse sind in Tabelle XII zusammengestellt.

Tabelle XII.

Wärmetönung bei der Autoxydation von „Zuckergas".

a	b	c	d	e	f	g
Versuch Nr.	Temperatur beim Einblasen	Beobachtete Höchsttemperatur	Temperaturerhöhung $c-b$	Temperaturverlust durch Strahlung	Wirkliche Temperaturerhöhung $d+e$	Eingeblasener Zucker mg
1	393	392,35	−0,65	6,80	6,15	—
2	393	393,34	0,34	7,65	7,99	83
3	403,5	404,86	1,36	4,40	5,76	78
4	405	409,11	4,11	5,87	9,98	80
5	405	406,36	1,36	4,68	6,04	83
6	406,5	409,99	3,49	4,80	8,29	85
7	408	408,00	0,00	4,80	4,80	69
8	409	409,85	0,85	4,80	5,65	81
9	409	409,17	0,17	4,68	4,85	80

Es sei bemerkt, daß das Einblasen des Staubes stets bei fallender Temperatur erfolgte, daß also die gemessene Temperaturerhöhung nicht auf Wärmezufuhr von außen zurückgeführt werden kann.

Beyersdorfer zieht aus seinen Messungen folgende Schlüsse über den qualitativen Verlauf der Staubexplosion: „Zunächst wird der Zucker ‚vergast', vergast im Sinne der Steinkohle bei der trockenen Destillation. Die Wärme zur Vergasung wird, da keine neue Wärme zugeführt, im Gegenteil: ja nur ausgestrahlt wird, dem heißen System des Thermostaten entnommen, und zwar in erster Linie dem Innern des Explosionskolbens. Die beobachtete Temperaturerhöhung rührt im wesentlichen von der Wärme her, die durch das System ‚Zuckergas'-Luft bei der Versuchstemperatur als Folge einer chemischen Reaktion gebildet wurde. Der Luftstickstoff scheidet aus, bleibt also nur noch die Reaktion zwischen Sauerstoff und ‚Zuckergas'. Die Wärmetönung ist somit die Folge einer Oxydation.

Der Vorgang der Entzündung verläuft demnach in zwei Phasen:

1. Phase: ‚Vergasung' des Zuckers,

2. Phase: Oxydation des ‚Zuckergases'.

Sind Sauerstoffgehalt und Temperatur hinreichend groß, so verursacht die Oxydationswärme die Zündung. Ob die Zündung eine Entflammung oder eine Explosion zur Folge hat, hängt wiederum ab von der Größe des Sauerstoffgehaltes und der Temperatur.

Folgende grobe Überschlagsrechnung möge einen rohen Begriff von der Wärmetönung bei der Oxydation des ‚Zuckergases' geben, wenn letztere

nicht zur Zündung führt. — Zugrunde gelegt sind folgende annähernden Mittelwerte der Tabelle XII: Versuchstemperatur 400° C; Temperaturverminderung durch das Vergasen von 80 mg Zucker 12,4° C; wirkliche Temperaturerhöhung 6,6° C; Temperaturerhöhung durch die Oxydation somit 19° C. Gewicht des Aluminiumsäckchens 2,2 g; spezifische Wärme des Aluminiums bei 400° C 0,246; Gewicht der 600 cm^3 Luft bei 400° C 0,3 g; spezifische Wärme der Luft bei 400° C 0,237; mittlere spezifische Wärme der 2,5 g Aluminium + Luft bei 400° C 0,245. Unter der Annahme, daß keine Wärme aus dem Explosionskolben verlorengehe und daß aus 80 mg Zucker 80 mg ‚Zuckergas' entstehen (der ‚Koksrückstand' fällt nicht ins Gewicht), erhält man für die ‚Vergasungswärme' des Zuckers 95 cal/g und für die Wärmetönung der Oxydation des ‚Zuckergases' 145 cal/g."

Dem Zuckerstaub entsprechend verhalten sich auch die anderen organischen Stäube.

Daß Staubexplosionen in zweiter Phase Gasexplosionen sein müssen, geht auch aus folgender Überlegung hervor: Eine Staubexplosion ist ein Verbrennungsvorgang. Brennen, d. h. mit Flamme brennen, können nur Gase. Bei einer Stearinkerze brennt nicht das feste oder flüssige (geschmolzene) Stearin, sondern erst der Stearindampf. Ebensowenig brennt flüssiges Petroleum. Ein brennendes Zündholz in Petroleum getaucht erlischt bekanntlich. Feste Körper glühen nur. Wenn z. B. Koks brennt, so verbrennt nur das primär entstandene Kohlenoxydgas mit Flamme zu Kohlensäure. Der Koks (Kohlenstoff) glüht und wird an seiner Oberfläche durch den Sauerstoff der Luft zu Kohlenoxyd oxydiert, welches dann weiter mit Flamme zu Kohlensäure verbrennt.

Selbst reine Staubexplosionen sind letzten Endes Gasexplosionen.

Literatur.

1) Eicksen, Hoppe: Verh. Polyt. Ges. Berlin, 1858.
   Prejava: Stenogr. Ber. 3. Vers. Dtsch. Müller 1869, S. 74.
2) Fischer: l. c. 1, Prejava.
   Kühl: Dingl. Journ. 207, S. 367.
3) R. Weber: Verh. Ver. Beförderung Gewerbefleiß. 1878, S. 89.
4) Feststellung d. Komm. d. Zuck.-Berufsgenossenschaft usw., Ber. üb. d. Expl. in d. Zuck.-Fabr. Frankenthal am 16. Mai 1917.
5) Holtzwart u. v. Meyer: Dingl. Polyt. Journ. 1891, S. 185.
6) Faraday: Vortrag Roy. Inst. am 17. Jan. 1845.
7) Engler: Chem. Ind. 8 (1885), S. 171.
8) Stockmeier: Bayr. Gewerbeztg. 11 (1898), S. 261.
9) M. M. Richter: Chem. Ztg. 1906, S. 324.
10) Beyersdorfer: Ber. Dtsch. Chem. Ges. 55 (1922), S. 2577. — Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 72 (1922), S. 496.

VII. Staubexplosionen – Staubgewitter.

Von den vielen hundert Staubexplosionen, die sich in den Ländern mit entwickelter Technik ereignet haben, ist die Ursache einer stattlichen Anzahl unaufgeklärt geblieben. Damit soll und kann nicht gesagt sein, daß die angenommene Ursache aller sog. aufgeklärten Explosionen auch tatsächlich die richtige und einzig mögliche ist. Die auffallende Tatsache, daß sich Staubexplosionen in ganz neuzeitlich eingerichteten Betrieben ereignet haben, in Betrieben, die auf Grund der Erfahrungen vorangegangener Explosionen, deren Ursachen man erkannt zu haben glaubte, neu errichtet worden waren, in Betrieben also, in denen nach menschlichem Ermessen die bekannten thermischen Ursachen ausscheiden mußten, bestimmten Beyersdorfer, nach einer bisher nicht bekannten Ursache zu fahnden. Und er glaubte diese auf Grund seiner — bereits mitgeteilten — Untersuchungen in der elektrostatischen Eigenladung des Staubes gefunden zu haben. Um diese Kategorie von Staubexplosionen möglichst treffend zu kennzeichnen und um gleichzeitig das noch Unbekannte, Rätselhafte zum Ausdruck zu bringen, das wie ein Schleier noch die feinsten Einzelheiten des Vorganges umhüllt, hat er für sie den Begriff Staubgewitter geprägt (1).

Anläßlich der ersten größeren Staubexplosionen um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts konnte man sich zunächst nicht entschließen, den Staub als die eigentliche Ursache anzuerkennen. Man suchte nach Gasen und griff freudig die Gärungskohlensäure des Stärkekleisters auf. Als im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts Riemen- und Bürstenelektrizität für eine mögliche Explosionsursache erklärt wurden, wollte man sie auch nicht gelten lassen. Das gleiche Schicksal teilen heute die Staubgewitter. Berthold Block (2) schreibt: „Wenn die ‚Staubgewitter' die Ursache von Explosionen wären, dann müßte, worauf Prof. Ullmann gelegentlich persönlich hinwies, schließlich in einer großen, trockenen Papiertüte der Staub bei lebhaftem Schütteln zur Explosion gebracht werden können." — Beyersdorfer ist es allerdings nicht gelungen, in größerem Maßstabe willkürlich in Mühlen Staubgewitter hervorzurufen, was Block zum schlüssigen Beweis fordert. Er betrachtet vielmehr als Hauptstütze seines Erklärungsversuchs eine Reihe von meteorologischen Tatsachen. Wegen der Bedeutung dieser Tatsachen für die noch problematischen Staubgewitter sei ausführlicher darauf eingegangen.

Es ist bekannt, daß der Ausbruch von Vulkanen zu Gewitterbildung führen kann, wobei die Träger der Elektrizität die ausgeworfenen Staub- und Aschemengen sind. Aus der Geschichte der Ausbrüche des Vesuvs

ist überliefert, daß, nachdem in der Pinienwolke Blitze aufgezuckt waren, die Wolke als Aschenregen — Aschenwolkenbruch — zur Erde fiel. Pompeji ist so zugrunde gegangen. Palmieri (3) hat bereits festgestellt, daß die Stärke der Elektrisierung der Luft bei Vulkanausbrüchen von der ausgeworfenen Aschenmenge abhängt. Sapper (4) berichtet, daß namentlich die windgeschützte Seite mittelamerikanischer Vulkane so stark elektrisierte Luft hat, daß dort die Elektrizität „den Leuten aus den Kleidern geht". Allenthalben treten Kugelblitze auf, die, ohne Schaden anzurichten, mit dumpfem Knall zerplatzen. Knoche (5) sah bei einem starken Gewitter am Fuße des 2800 m hohen Vulkans Villa-Rica in Chile haushohe Flammen den Schneeberg entlang hüpfen. Nach der elektrischen Entladung fiel wie beim Vesuv der Aschenregen zu Boden. In Dominika treten öfters bei den Stürmen (Hurrikanen) auch bei klarem Himmel Flächenblitze auf (3). Bei Staubstürmen in Kansas (6) beobachtet man bei außerordentlich trockener Luft an Zäunen, Mühlen u. dgl. Funken von mehreren Zoll Länge. Der wolkenlose Himmel ist dabei von einer kupferfarbigen Dunstschicht bedeckt. Auch die von Rudge (3) in Südafrika beobachteten Staubstürme haben eine ähnliche Wirkung. Leuchtturmwärter am Indischen Ozean berichten von starken St. Elmsfeuer und von Flächenblitzen bei meist geringer Bewölkung (3). Alle diese elektrischen Erscheinungen sind auf Staubelektrizität zurückzuführen. Besonders interessant ist die Beobachtung eines englischen Schiffskapitäns (7), der nachts bei Kap Verde, wo nur hohe Wolken und Sterne sichtbar waren, eine Stunde lang rings um sein Schiff Blitze zucken sah und Donner krachen hörte. Dabei wehte ein warmer, staubgeladener Wind von der afrikanischen Küste her. Masten und Tauwerk sahen aus, als hätten sie Glühlampen und ein Knistern und Krachen war hörbar, wie von brennenden Zweigen. In Rheinhessen ist in einer durch einen Wirbelwind erzeugten Straßenstaubwolke ein flächenblitzartiger Feuerschein beobachtet worden (8). Bei allen diesen Naturbeobachtungen ist es allein durch die Reibung in stark staubhaltiger Luft zur Elektrisierung und Elektrizitätstrennung gekommen.

Würden die mineralischen Stäube, welche mit die Ursache aller der genannten Naturerscheinungen sind, aus brennbarem Stoffe bestehen, so würden sie durch die elektrischen Ausgleichsvorgänge ebenso gezündet werden wie eine Mehl- oder Zuckerstaubwolke.

Verfasser ist durch eine Privatmitteilung bekannt geworden, daß bei starken Erdölausbrüchen aus Bohrlöchern das Erdöl häufig ohne fremde Energiezufuhr zu brennen anfängt, und zwar erst etliche Meter über dem Erdboden. Verfasser ist geneigt, diese Selbstentzündung auch auf eine elektrostatische Ursache zurückzuführen. Wenn Naphtha unter

hohem Druck ausbricht, so werden zum mindesten die Randteile zerstäubt und dabei elektrisch aufgeladen. Bei hohen Drücken im Verhältnis zur Ausströmungsöffnung haben wir gleichsam eine Düsenwirkung. Überschreitet die elektrische Aufladung der Naphthateilchen ihre Kapazität, so muß es zum elektrischen Ausgleichsvorgang, zum Funken oder Blitz in der Naphthastaubwolke kommen. Da sie aus brennbarem Stoff besteht, muß sie gezündet werden. Die Entstehung der Heiligen Feuer von Baku dürfte sich ähnlich erklären lassen. Will man den biblischen Feuerregen von Sodom und Gomorra als historische Tatsache gelten lassen, so kann man ihn mit Hilfe der eben entwickelten Anschauungen zwanglos erklären (1). Bei einem gewaltigen Ausbruch einer Naphthaquelle — etwa im Kaukasusgebiet — entstand eine Naphthawolke, ein Naphthaaerosol, durch die Zerstäubung und die dadurch bedingte elektrische Aufladung des flüssigen Erdöls beim rasenden Austritt aus den Erdspalten. Über Sodom und Gomorra, wohin die Wolke vom Ort ihrer Entstehung getrieben wurde, kam es zum elektrischen Ausgleichungsvorgang in der Wolke, zu einem Blitz, wie etwa bei einem gewöhnlichen Gewitter. Das Naphtha wurde entzündet und fiel als brennender Naphtharegen herab; der plötzlich herbeigeführte isoelektrische Punkt mußte zur Sedimentation, zum Niederschlag, führen.

Daß Staubwolken — ob sie aus festen oder flüssigen Stoffen bestehen, ist gleichgültig — elektrische Ladungen enthalten, ist experimentell bewiesen. Dafür, wie diese Ladungen zustande kommen, gibt es verschiedene wissenschaftlich begründete Erklärungen. Welche und wie viele Umstände aber zusammentreffen müssen, um den blitzähnlichen elektrischen Ausgleichsvorgang herbeizuführen, das wissen wir nicht. Wegen dieser noch unbekannten Faktoren hat Beyersdorfer die hier behandelte Kategorie von Staubexplosionen als Staubgewitter bezeichnet.

Von den verschiedenen technischen Stäuben werden diejenigen am meisten zur Staubgewitterbildung neigen, welche die besten Isolatoren sind, also die niedrigste Dielektrizitätskonstante haben. Diese Festlegung hindert nicht anzunehmen, daß auch Aluminiumstaub der Gewitterbildung fähig ist; denn Aluminium überzieht sich an neugebildeten Oberflächen sofort mit einer Oxydschicht, so daß Aluminiumstaub in seinem physikalischen Verhalten wie ein Metalloxyd wirkt: er ist als Isolator aufzufassen.

Es drängt sich hier die Frage auf, ob denn in den Zerkleinerungsmaschinen, wo doch so häufig der eigentliche Explosionsherd zu suchen ist, so große Elektrizitätsmengen und Ladungsdichten möglich sind, daß es zum Staubgewitter kommen kann. Dadurch, daß Staubgewitter gesagt wird, kann man versucht sein, an eine größere Staubwolkenmasse zu

denken; aber schließlich kommt es ja nicht darauf an, wie groß der Blitz ist und die Wolkenmasse, die durch ihn primär entzündet wird. Um eine große Explosion auszulösen, genügt es, wenn gewissermaßen primär nur ein Wolkenelement, ein kleiner Ausschnitt aus einer Wolke, gezündet wird. Durch die frei werdende Verbrennungswärme werden weitere Wolkenelemente gezündet werden, ebenso wie durch die gleichsam punktförmige Wärmequelle einer Stichflamme zunächst nur ein kleiner Komplex von Elementarteilchen einer Wolke entflammt wird, der dann weitere Wolkenelemente zur verhängnisvollen Explosion in Brand setzt.

Gerade am Ort der eigentlichen Zerkleinerung dürfte die größte Staubgewitterneigung bestehen. Hier haben wir im Augenblick des Zerkleinertwerdens den gefährlichsten, den allerfeinsten Staub in größter räumlicher Dichte. Durch den Vorgang der Zerkleinerung hat er seine elektrische Ladung bekommen. Da der Staub in der Zeit um den Augenblick seiner Entstehung herum noch keinen nennenswerten Weg zurückgelegt hat, war ihm auch keine Gelegenheit geboten, seine Ladung durch teilweise Abgabe an die Umgebung zu verringern. Neben der größten Raumdichte des Staubes haben wir also auch gleichzeitig seine größte Ladungsdichte. Zwei entschieden explosionsgünstige Faktoren treffen hier zeitlich zusammen.

Wenn die Gefahr so groß ist, warum gibt es dann nicht noch häufiger Staubexplosionen? — Zum Zustandekommen eines Staubgewitters gehört eben das gleichzeitige Zusammentreffen von noch viel mehr explosionsgünstigen Umständen. Ein solcher bekannter Umstand ist der Feuchtigkeitsgehalt der Luft bzw. die durch ihn bedingte bessere elektrische Leitfähigkeit der Luft. Darum finden auch in Gegenden mit überwiegend trockener Luft, wie in den Vereinigten Staaten von Nordamerika, ungleich viel mehr Staubexplosionen statt als in Ländern, deren Luft im Durchschnitt einen hohen relativen Feuchtigkeitsgehalt hat.

Daß auch erhöhte Lufttemperatur die Entstehung eines Staubgewitters, wie jeder anderen Staubexplosion, begünstigen muß, ist ohne weiters klar. Ein elektrostatischer Entladungsfunke, dessen Energie z. B. gerade noch ausreichend ist, eine Staubwolke von — sagen wir — 50^0 zu zünden, wird nicht mehr in der Lage sein, eine Staubwolke von nur 30^0 zu entflammen. Es kommt ja nicht auf die nebeneinander bestehenden Energieformen an, sondern lediglich auf die Energiesumme. Die Unzahl der Dreschmaschinenexplosionen mit elektrischer Ursache in den Vereinigten Staaten von Nordamerika während heißer, trockener Sommer ist der beste Beweis für den explosionsgünstigen Einfluß von Trockenheit und Wärme.

Für die Annahme der Staubgewitter als Explosionserscheinung sind sicher noch experimentelle und Erfahrungsbeweise erwünscht. Dennoch

dürften mit Hilfe der Staubgewitteranschauung manche in ihren Ursachen noch nicht erkannte Explosionen — auch in Deutschland mit seinem nicht ausgesprochen heißen und trockenen Klima — ihre Erklärung finden können.

Literatur.

1) Beyersdorfer: Kolloid Ztschr. 33 (1923), S. 106.
2) B. Block: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 74 (1924), S. 51.
3) K. Kähler: Elektrizität d. Gewitter. Gebr. Bornträger, Berlin 1924, S. 99.
4) E. Sapper: Meteorolog. Ztschr. 22 (1905), S. 139.
5) W. Knoche: Meteorolog. Ztschr. 32 (1915), S. 555.
6) S. D. Flora: Monthly Weather Rev. 41 (1913), S. 416 u. S. 894.
7) Meteorolog. Ztschr. 20 (1903), S. 189.
8) P. Beyersdorfer u. F. Kercher: Meteorolog. Ztschr. 39 (1922), S. 395.

VIII. Verlauf und Wirkung einer Staubexplosion.

Um dem Lauf einer Staubexplosion folgen und um ihre Wirkung begreifen zu können, müssen wir versuchen, uns in das Getriebe einer neuzeitlichen Mühlenanlage hineinzuversetzen und uns wenigstens ein schematisches Bild zu machen von dem System der Zerkleinerungsmaschinen, Siebvorrichtungen, Entstaubungs- bzw. Staubsammelanlagen mit Fördermaschinen. In einer Mühle, in der grobstückiges Gut verarbeitet wird, geht der eigentlichen Feinmahlung das Schroten und die Grobzerkleinerung voraus. Transportelemente der verschiedensten Systeme bringen das Gut den Zerkleinerern zu bzw. von einem zum andern; häufig nicht auf direktem Wege, sondern auf dem Umweg über Siebvorrichtungen, welche den Zweck haben, die bereits vorhandenen oder erzeugten verschiedenen Feinheitsgrade zu trennen. Die verschiedenen Zerkleinerungs- und Sichtmaschinen wie auch die den Mahlguttransport betätigenden Fördereinrichtungen sind durch ein System von Rohrleitungen mit den Entstaubungs- bzw. Staubsammelanlagen verbunden.

Die folgende Übersicht (1) möge einen Überblick geben über die verschiedenen zur Verwendung kommenden Systeme der eben genannten Maschinengruppen.

I. Zerkleinerungsmaschinen:
  1. Vorbrecher:
    a) Backenquetschen (Steinbrecher, Kauwerke),
    b) Kegelbrecher (Kreiselbrecher);

2. Schroter:
   a) Walzwerke
   b) Brechschnecken
   c) Kollergänge } Grobschroter.
   d) Glockenmühlen
   e) Schlag- und Schleudermühlen: Feinschroter,
3. Mühlen:
   a) Stampfmühlen (Pochwerke),
   b) Mahlgänge und Fliehkraftmühlen,
   c) Kugelmühlen,
   d) Naßmühlen.

II. Siebvorrichtungen:
1. Feststehende Siebe:
   a) Stangenroste,
   b) Drahtgeflechte;
2. Bewegliche Siebe:
   a) Schwingende Roste,
   b) umlaufende Trommeln von rundem oder vieleckigem Querschnitt,
   c) Rätter:
      α) Schüttelsiebe, die eine pendelnde Bewegung in der Längs- oder Querrichtung der Siebebene mit oder ohne Stoßwirkung vollführen,
      β) Schüttelsiebe, die eine auf- oder abgehende Bewegung senkrecht zur Siebebene erhalten, zu der noch eine Stoß- oder Fallwirkung hinzutritt,
      γ) kreisende Siebe mit kreisrunder oder elliptischer Bahn genau oder nahezu in der Siebebene;
3. Windsichter.

III. Entstaubungs- bzw. Staubsammelanlagen:
1. Absitzenlassen des Staubes durch Verminderung der Luftgeschwindigkeit in Staubkammern;
2. Trennung von Staub und Luft durch trockene Filterung:
   a) Schlauchfilter,
   b) Sternfilter;
3. Staubabscheidung durch Fliehkraft: Zyklon;

4. Niederschlagung bzw. Herauslösung des Staubes aus der Luft mittels fein verteilter Wasserstrahlen:
   a) für sich allein,
   b) in Verbindung mit einem Zyklon,
   c) in Verbindung mit Zyklon und Naßfilter;
5. Staubniederschlagung durch hochgespannte elektrische Ströme (Koronaentladung).

IV. Förderanlagen:

1. Becherwerke (Elevatoren);
2. Förderrinnen:
   a) Förderschwinge (Schüttelrinne),
   b) Propellerrinne mit Wurfgetriebe,
   c) Torpedorinne,
   d) Polo-Rinne;
3. Kratzenförderer (Kettenschlepperrinne);
4. Förderschnecken;
5. Förderbänder;
6. Schaukelbecherwerke;
7. Rutschen (durch eigene Schwere);
8. pneumatische Förderung durch Saug- oder Druckwirkung.

In den einzelnen Spezialmühlen finden je nach Art und Beschaffenheit des zu vermahlenden Stoffes und nach dem Endzweck der Zerkleinerung die geeigneten Systeme aus dieser Einteilung Verwendung.

Fast jede der genannten Anlagen ist schon durch Fahrlässigkeit oder unglückliche Zufälle zum Ausgangspunkt einer Staubexplosion geworden. Die weitaus größte Zahl der Staubexplosionen hat ihren Herd in den Zerkleinerungsmaschinen. Den Verlauf einer solchen Staubexplosion wollen wir als typisches Beispiel betrachten.

Kommt zu dem in der Zerkleinerungsmaschine in Streifen und Zonen verschiedener Dichte herumsprühenden Staub gefährlichen Feinheitsgrades an einer Stelle gefährlicher Konzentration die zur Entflammung ausreichende Energie, wobei es belanglos ist, ob die Energie in Form von Wärme oder Elektrizität auftritt, so kommt es zur ersten Partialexplosion. Die explosionsartig verbrennende Staubwolke braucht gar nicht groß zu sein. Es genügt, daß die von ihr ausgehende Stichflamme oder die von ihr ausstrahlende Wärme ein benachbartes Staubwölkchen oder -streifchen, das schon vorhanden oder erst entstanden ist, gleichfalls entflammt (zweite Partialexplosion). Durch die Verbrennungswärme aus den ersten Teil-

explosionen wird der begrenzte Raum auf immer höhere Temperatur gebracht und so günstigere Bedingungen für weitere zwangsläufig immer größere Teilexplosionen geschaffen. Diese Teilexplosionen folgen aufeinander in unendlich kleinen Zeiträumen. Jede Explosion erzeugt eine Stichflamme und eine Druckwelle, welche das Bestreben haben, den Weg des geringsten Widerstandes einzuschlagen. Dieser Weg ist vorgezeichnet durch das System der Entstaubungsrohre, in welchem durch die Saugwirkung der Ventilationsanlage ein gewisser Unterdruck herrscht. Sind die in der Zerkleinerungsmaschine entflammten Staubmassen groß genug, so wird in der Regel die Maschine zersprengt und ein Teil der Stichflammen und Druckwelle bahnen sich so einen Weg in den Mühlenraum, Staub aufwirbelnd und entzündend, wo er gerade getroffen wird. Sind die entflammten Staubmassen für eine derartige Sprengwirkung zu klein, so wird sich die Explosion, vorerst nur dem Zuge der Entstaubung folgend, fortpflanzen. Wo aber die Explosionswelle auf ihrem Wege irgendwo ruhenden Staub vorfindet, wie in Krümmungen und Knicken der Rohre, in Sichtern oder Förderanlagen, wird sie ihn zum gefährlichen Staub-Luftgemisch (Aerosol) aufwirbeln und der in ihrem Gefolge rasenden Stichflamme als neue Nahrung überlassen. Immer stärker und schneller wird so die Druckwelle, immer energiereicher die Stichflamme, bis sie schließlich am Ende des Systems der Entstaubung auf die dort in der Regel angehäuften Mengen des allerfeinsten und darum gefährlichsten Staubes treffen, den sie schließlich zur letzten und heftigsten Teilexplosion entfachen.

Für die Fortpflanzung und Ausbreitung der Explosion ist es aber gar nicht notwendig, wie schon gezeigt, daß die Stichflamme der ersten Glieder der Kette der Teilexplosionen die letzten erzeugt. Die Druckwelle ist infolge ihrer großen Geschwindigkeit, die oft ein Vielfaches der Schallgeschwindigkeit beträgt, für sich allein in der Lage, durch Kompression der Staub-Luftmassen, die sie vor sich herjagt, in diesen so viel Wärme zu erzeugen, daß es zu ihrer Selbstentzündung ausreicht.

Da aber der Staub beim Aufgewirbeltwerden mit so hoher Geschwindigkeit und so gewaltiger Druckentfaltung durch Reibung auch noch eine sehr starke elektrische Aufladung bekommt, kann allein durch die elektrische Energie der komprimierten Staubwolke Selbstentzündung erfolgen. Außerdem müssen noch die Kompressionswärme und die am Staub durch Reibung erzeugte Elektrizität zur gefährlichen Energiesumme zusammentreten. So ist es erklärlich, daß bei einer großen Staubexplosion im Nu die ganze Anlage in Flammen steht und in Trümmern liegt.

Die oft verheerenden Wirkungen von Staubexplosionen mögen die folgenden beiden Beschreibungen zeigen.

Explosion der Washburn Flower Mills zu Minneapolis, Minn. (2), am 2. Mai 1878. 18 Leute wurden getötet, 3 Mühlen vollständig vernichtet; Gesamtschaden 800000 Dollars.

An der Ostseite der sog. A-Mühle dienten 6 Satz Mahlsteine, die durch eine Rohrleitung mit der Staubkammer in Verbindung standen, zum Vermahlen von Mittelmehl. Einer dieser 6 Satz Mahlsteine war augenscheinlich leer gelaufen und die Überreste des Mahlgutes wurden durch das Leer- und Heißlaufen zum Glimmen gebracht. Der starke durch das Zentrum der Mahlsteine gehende Luftstrom hat die glimmenden Teilchen zu heller Flamme entfacht, welche ihrerseits den Staub in den Becherwerken und den Staubkammern zur Explosion brachte. In jedem Stockwerk des Gebäudes wiederholte sich der gleiche Vorgang. Der Druck der Explosion schleuderte die Mauern der A-Mühle nach allen Richtungen auseinander und das Dach ungefähr 400 Fuß hoch in die Luft. Die Explosionsdruckwelle und -flamme erreichten zwei andere noch in Betrieb befindliche Mühlen (Diamond und Humboldt), die ebenfalls explodierten, wobei die Mauern der am nächsten stehenden Mühle auf die umgestürzten Mauern der A-Mühle und die Mauern der dritten Mühle auf die der zweiten fielen. Gleichzeitig explodierte auch der Elevator. Das Dach flog in die Luft und das gesamte Holzwerk stand im Nu in Flammen. Drei andere Mühlen standen auf der entgegengesetzten Seite der Straße gegen die Windrichtung, so daß die Flammen sie nicht erreichen konnten. Da jedoch durch den Explosionsdruck die Fenster dieser Mühlen zerbrochen waren, wurden sie durch die großen Mengen brennenden Mehles, die über sie hinflogen, von oben bis unten in Brand gesetzt. Sie brannten ruhig nieder. Prof. Peckham, von dem diese Schilderung stammt, hat auf Grund von Versuchen berechnet, daß ein Sack Mehl und 4000 Kubikfuß Luft eine Kraft erzeugen können, die genügt, um 2500 t 100 Fuß hoch zu schleudern.

Explosion in der Zuckerraffinerie Frankenthal (3) am 16. Mai 1917.

Die Explosion hat im Vorbrecherraum bei den Backenquetschen stattgefunden. Der Vorbrecherraum befand sich im Erdgeschoß der Fabrik. 3 Stockwerke (Würfelzuckerstationen) lagen über ihm. Von den 4 Umfassungsmauern des Raumes war die östliche 400 mm, die übrigen waren je 800 mm stark. Die Decke war aus Eisenbeton. Die Verbindung vom Vorbrecherraum zur isoliert stehenden Mühle wurde durch einen 60 m langen Tunnel hergestellt. An der Südseite des Vorbrecherraumes lag unmittelbar das Kesselhaus. Der Silo des nächstliegenden Kessels war mit 400 dz Kohlen gefüllt.

Unter diesen Bedingungen erfolgte die Explosion. Die Stichflamme raste durch den Tunnel nach der Mühle, unterwegs 3 Arbeiter im Tunnel

so verbrennend, daß sie ihren Wunden erlagen. Auch in der Mühle wurden noch etliche Arbeiter durch Brandwunden, von dieser Stichflamme herrührend, leicht verletzt. 3 weitere Arbeiter — einer im Tunnel, zwei im Stockwerk über dem Vorbrecherraum—erlitten durch Verschüttung den Tod.

Die Umfassungsmauern des Vorbrecherraumes — 3 davon 800 mm stark! — wurden vollständig umgelegt. Die 1500 kg schweren Vorbrecher wurden so durcheinander gewürfelt, daß sie schließlich auf dem Kopfe standen (Fig. 12).

Die Betondecke des Vorbrecherraumes und die darüber befindlichen

Fig. 12.
Wirkung einer Zuckerstaubexplosion.

2 Balkendecken wurden weggeschleudert und stürzten im Tunnel und den benachbarten Gebäuden zusammen. Die aus Eisenbeton errichtete Stütze des Kohlensilos hinter der 800 mm starken Mauer wurde an einer Stelle vollkommen durchschlagen. Nur noch die Rundeisenarmierung hielt sie zusammen. Die 400 dz Kohlen entleerten sich durch den sich von selbst öffnenden Schieber in das Kesselhaus. In der neuen Mühle selbst ist, abgesehen von einem Becherwerk, das an der Einmündung des Tunnels in die Mühle sich befand, kein nennenswerter Schaden angerichtet worden. Das leicht gebaute Glasdach der Mühle wurde nach außen gedrückt. Die auf Grund der Erfahrungen der Explosion vom 9. Februar 1916 geschaffene Mühlenanlage hatte sich also vorzüglich bewährt.

Literatur.

1) Naske: Zerkleinerungsvorrichtungen u. Mahlanlagen. III. Aufl. Otto Spamer, Leipzig 1921.
2) S. F. Peckham: Journ. Soc. Chem. Ind. 26 (1907), S. 244.
3) Beyersdorfer: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 72 (1922), S. 478.

IX. Die Gefahren des ruhenden Staubes.

Dem ruhenden Staub, der in stauberzeugenden Betrieben allenthalben, aber oft unvermeidlich, anzutreffen ist, hat man anscheinend nicht die gebührende Beachtung geschenkt. Es erscheint die Behauptung berechtigt, daß man die Gefahr des schwebenden Staubes vielfach überschätzt, die des ruhenden Staubes aber unterschätzt hat. Wenn in einem modernen Mühlenraum sich nicht gerade ein Betriebsunfall ereignet hat derart, daß z. B. ein Sack od. dgl. geplatzt ist, wird der Staubgehalt der Luft kaum eine gefährliche Konzentration erreichen. Selbst wenige Fachleute haben einen Begriff davon, wie eigentlich eine Staubwolke gefährlicher Konzentration aussieht. Schon Prof. Weber hat darauf hingewiesen (siehe S. 22). Ein Laie, der einmal von Staubexplosionen gehört hat, wird sicher einen mit schwebendem Staub erfüllten Raum fluchtartig verlassen, in dem der Staub so dicht ist, daß er nur wenige Meter weit sehen kann. Und doch besteht in einem solchen Raum keine unmittelbare Explosionsgefahr, weil die Staubkonzentration 1 g/m³ kaum überschreiten dürfte. Hierzu schreibt Beyersdorfer (1):

„Anläßlich unserer Versuche über die elektrischen Erscheinungen beim Durchblasen von Zuckerstaub durch einen feinen Schlitz haben wir stets in etwa 3 Sek. 40 g Zucker in den 60 m³ großen Dunkelraum hineingeblasen. Der Raum war dann so stark mit Staub erfüllt, daß man von der Türe aus gerade noch die gegenüberliegende schwarze Wand sehen konnte (Entfernung 5 m). Die Personen im Raum waren im Nu wie bereift und entsetzt über den dicken Staub. Und das alles bei einer Konzentration von günstigsten Falles $^2/_3$ g/m³. Nach fast jedem der Versuche haben wir sofort im Raum in der Staubwolke ein Streichholz angezündet, wir sind auch mit einem mit großer Flamme brennenden Stück Papier hineingegangen, ohne daß es jemals zu einer Verpuffung oder gar Explosion gekommen wäre. Man sah die in die Flamme hineintanzenden Staubteilchen ruhig verbrennen, ohne ihre Nachbarschaft durch ihre Verbrennungsflamme in Mitleidenschaft zu ziehen. Wir waren so leichtsinnig, weil wir wußten, gestützt auf Rechnung und Versuch, daß nichts passieren

konnte. Man vergegenwärtige sich nur, daß bei einer Teilchengröße von 10^{-6} cm Kantenlänge und bei einem Teilchenabstand von $44 \cdot 10^{-6}$ cm, die von einem Teilchen ausgehende Stichflamme, um das benachbarte nächste Teilchen zu treffen, eine Strecke durchlaufen müßte, die 44 mal so lang ist als das Teilchen selbst.

Für den Fall, daß nur die Staubkonzentration 0,5 g/m³ herrscht, wie dies wohl wirklich beim Dunkelkammerversuch der Fall war, kommt man zu einem lichten Abstand der Teilchen von $146 \cdot 10^{-6}$ cm, d. h. um seinen Nachbar zu treffen, muß ein Teilchen eine Strecke durchlaufen, die 146 mal so lang ist als es selbst.

Nun erklärt sich auch zwanglos die Tatsache, daß in unserer alten Mühle jahrzehntelang 4 offene Gasflammen (Schmetterlingsbrenner) Tag und Nacht in der Staubkammer brannten, ohne eine Explosion zu veranlassen. Die Staubkonzentration in der Staubkammer hat eben niemals 17,5 g/m³ überschritten. Dafür, daß in den Staubkammern der Herd der Explosion liegen kann, besteht nur sehr geringe Wahrscheinlichkeit. Die Staubkammern vergrößern nur die Heftigkeit der Explosion wie jeder Raum, in dem Staub angehäuft ist. Und zwar ist nicht der schwebende, sondern der ruhende Staub die Ursache."

Der in den sog. Entstaubungsanlagen aufgehäufte Staub ist, wie schon erwähnt, häufig die Ursache des katastrophalen Ausgangs einer Staubexplosion. Angenommen, ein Staubsammler, z. B. ein System von Schlauchfiltern, enthalte 1 dz Staub. Wenn die Explosion diese Anlage erreicht, so ist der in ihr angehäufte Staub fähig, eine Stichflamme von unter Umständen 100 m Länge bei 10 m² Querschnitt zu bilden.

Aber nicht nur diese relativ großen, im Innern der Maschinen und Rohrleitungen u. dgl. ruhenden Staubmengen bedeuten eine Gefahr. Auch die so unscheinbaren, häufig unbeachteten, losen, dünnen Schichten von Staub, die in stauberzeugenden Betrieben auf dem Fußboden, an Decken und Wänden, an Gebälk und auf Maschinenteilen anzutreffen sind, stellen eine nicht zu unterschätzende Gefahr dar. Die unmittelbare Ursache einer Explosion kann dieser Staub allerdings nicht werden. Er kann aber teil daran haben, daß eine Explosion oder ein Fabrikbrand verheerende Ausmaße annimmt. Denn dieser Staub kann sowohl durch die Druckwelle irgendeiner Explosion — es braucht keine Staubexplosion zu sein — wie auch bei einem Brande durch den Zug der sog. Kaminwirkung des Feuers bei nicht ganz geschlossenen Räumen aufgewirbelt werden, so daß er den Raum, wenn auch nur schicht- oder strichweise, mit einer Staubwolke gefährlicher Konzentration erfüllt, die, wenn sie mit einer Flamme od. dgl. in Berührung kommt, sofort explodiert, den ganzen Raum momentan in eine Flamme hüllend.

Jaeckel und Beyersdorfer (2) haben berechnet — allgemein und für das Beispiel des Zuckerstaubes —, wie hoch solcher locker geschichteter Staub auf den 6 Begrenzungsflächen eines Raumes allerhöchstens liegen darf, wenn er gerade keine Explosionsgefahr mehr bedeuten soll. Das Raumgewicht des locker geschichteten Staubes sei s (für Zucker vom spezifischen Gewicht 1,6 wurde s zu 0,5 experimentell ermittelt).

Die Staubkonzentration der unteren thermischen Explosionsgrenze sei c g/m³. Aus diesen beiden Angaben läßt sich die Grenzhöhe Δ unter Annahme gleichmäßiger Verteilung des Staubes leicht berechnen.

Die Ausmaße des Raumes in Metern seien l, b und h. Dann dürfen sich in dem Raum nicht mehr als $l \cdot b \cdot h \cdot c$ g, entsprechend $l \cdot b \cdot h \cdot \frac{c}{s}$ cm³ Staub befinden. Diese Menge verteilt sich nach der Annahme gleichmäßig auf die Innenfläche des Raumes, die eine Ausdehnung von $2 \cdot (l \cdot b + l \cdot h + b \cdot h) \cdot 10^4$ cm² hat. Man erhält schließlich

$$\Delta = \frac{\frac{c}{2s}}{\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}} \cdot 10^{-4} \text{ cm} .$$

Für Zucker wird $\frac{c}{2s} = 21$.

Die Grenzhöhe des Staubes Δ ist sonach direkt proportional der Anzahl Gramm Staub im Kubikmeter und umgekehrt proportional der Summe der reziproken Werte der Dimensionen des Raumes.

Einige Zahlenbeispiele für die Staubkonzentration $c = 21$ g/m³ und für das Raumgewicht des Staubes $s = 0{,}5$ mögen die Formel erläutern. (Tab. XIII).

Man sieht: Je kleiner der Raum (Verschlag!), um so weniger hoch darf der Staub liegen. Schon geringe Staubmengen — wenige hundertstel Millimeter Staubhöhe — bedeuten eine erhebliche Gefahr. Bei gleichem Rauminhalt darf in niedrigen, langgestreckten Räumen der Staub bei weitem nicht so hoch liegen wie in hohen, breiten Räumen. Je größer bei gleichem Rauminhalt die Innenfläche des Raumes ist, um so weniger hoch darf der Staub liegen. Die geringste Gefahr droht in Räumen, die der kubischen Form sich nähern.

Bei dieser Rechnung hat die große innere Oberfläche von Fabrikationsräumen, die bedingt wird durch die Maschinen, Rohrleitungen, Träger u. dgl. keine Berücksichtigung gefunden. Durch den Staub, der auf diesen Gegenständen herumliegt, wird die Gefahr des ruhenden Staubes noch erhöht.

Tabelle XIII.
Die zulässige Dicke dünner Staubschichten.

Nr.	Raumdimensionen in m			Fläche in m^2	Inhalt in m^3	Staubhöhe in 0,001 mm
	Länge	Breite	Höhe			
1	1	1	1	6	1	7
2	4	4	4	48	64	28
3	8	4	2	56	64	24
4	16	2	2	68	64	22,3
5	8	8	8	384	512	56
6	16	8	4	448	512	48
7	16	16	2	640	512	33,6
8	32	8	2	672	512	32
9	64	4	2	784	512	27,4
10	128	2	2	1032	512	20,8
11	12	12	12	864	1728	84
12	24	12	6	1008	1728	72
13	24	24	3	1440	1728	50,4
14	48	12	3	1512	1728	48
15	06	6	3	1764	1728	41,1
16	192	3	3	2320	1728	31,2
17	432	2	2	3464	1728	21
18	1728	1	1	6914	1728	10,5

Aber nicht nur dadurch, daß er zum explosiblen Staub-Luftgemisch aufgewirbelt werden kann, wird der ruhende Staub zur Gefahrenquelle. Er kann auch dadurch, daß er fortgesetzt ruht, zum Unheilstifter werden. Wenn organischer Staub längere Zeit auf heißen Gegenständen lagert — auf Dampfleitungen, ungeschützten elektrischen Glühlampen — so kann er in pyrophore Kohle übergehen (siehe S. 64). Er kann auch mit Öl in Berührung kommen und dadurch autoxydabel werden (siehe S. 65). Der ruhende Staub kann so zur thermischen Explosionsursache sich entwickeln.

Literatur.

1) Beyersdorfer: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 72 (1922), S. 519.
2) Jaeckel u. Beyersdorfer: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 73 (1923), S. 153.

X. Verhütung von Staubexplosionen.

Es ist gezeigt worden, daß drei und nur drei Faktoren für das Zustandekommen einer Staubexplosion nötig sind: Staub, Energie und Sauerstoff. Zur Verhinderung von Staubexplosionen muß folgerichtigerweise bei jedem dieser drei Faktoren angegriffen werden. Da man in der Praxis keinen dieser drei Faktoren Null werden lassen kann, muß dafür Sorge getragen werden, jeden einzelnen dieser Faktoren im Bereich des technisch Möglichen weitgehendst zu reduzieren, um mit größtmöglicher Wahrscheinlichkeit zu erzwingen, daß das Produkt möglichst klein bleibt und die zur Explosion führende Grenze nicht überschreitet.

Der Kampf gegen die Staubexplosionen ist also nach drei Fronten zu führen: gegen den Staub, die Energie und den Sauerstoff. Im folgenden soll nur versucht werden, gleichsam große taktische Gesichtspunkte für diesen Dreifrontenkrieg zu entwickeln; die Technik der Kampfführung und die Auswahl der geeigneten Mittel muß den einzelnen Gruppen (Betrieben) überlassen werden und ist der Eigenart ihres Gegners (Staubes) anzupassen.

1. Die Bekämpfung des Staubes.

Da häufig der Zweck der staubgefährdeten Betriebe die Erzeugung von Staub — Mehl, Puder, Pulver — ist, ist der Bekämpfung des Staubes eine Grenze gezogen. Aber hier wie in anderen Betrieben, wo der Staub nur eine lästige Nebenerscheinung ist, kann man durch Wahl der richtigen Maschinen die Gefahren des Staubes wesentlich eindämmen.

Die Zerkleinerung zur Staubfeinheit erfolgt bekanntlich nicht in einem Arbeitsgang, mehrere Zwischenstufen werden durchlaufen: Vorbrechen, Schroten, Mahlen. Je gefährlicher ein Staub ist und je mehr er bereits bei der Vorzerkleinerung zur Bildung relativ überzerkleinerten Gutes, Staubes, neigt, z. B. infolge seiner Sprödigkeit und seiner leichten Zerstäubbarkeit, um so mehr Sorgfalt muß auf die Wahl der Vorbrecher und Schroter verwendet werden. Man wählt dann zweckmäßig „freie" Zerkleinerer. Das Idealziel der „freien" Zerkleinerung ist es, die Zerkleinerung nicht weiter zu treiben als gerade bis zum gewünschten Feinheitsgrad. Jede unerwünschte Nebenwirkung — zu weitgehende Zerkleinerung — soll ausgeschlossen sein. Man ist bestrebt, das zerkleinerte Gut sofort zu entfernen, um unnötige Staub- und Wärmeentwicklung zu vermeiden. Die Forderung der „freien" Zerkleinerung wird am besten erfüllt 1. von Backenquetschen, die die größte Bewegung im Spalt ausüben, 2. von Walz-

werken ohne Differentialgeschwindigkeit, 3. von Brechschnecken und 4. von Kollergängen.

Da einmal selbst bei der „freien" Zerkleinerung die Staubbildung nicht ganz vermieden werden kann, zum andernmal die sog. freien Zerkleinerer aus mancherlei wirtschaftlichen und örtlich bedingten Gründen nicht verwendet werden können, da man also gezwungen ist, auch mit Maschinen zu arbeiten, die als große Stauberzeuger anzusprechen sind (Schlagkreuzmühlen wie alle Feinschroter), muß man bestrebt sein, das aus einer Mahlmaschine anfallende Gut, ehe es zur weiteren Zerkleinerung in eine andere Zerkleinerungsmaschine gelangt, durch Sichten vom Staub zu befreien. Wo angängig, wie z. B. bei Zucker, arbeitet man zweckmäßig nach dem Schema: Vorsichter — Vorbrecher — Grobsichter — Schroter — Feinsichter — Mühle — Feinstsichter (Windsichter). Von den Sichtern dürften in den meisten Fällen die umlaufenden Trommeln von rundem oder vieleckigem Querschnitt den verschiedenen Systemen der Rätter vorzuziehen sein. Die Staubaufwirbelung in den Rättern ist größer als in mäßig geschwind umlaufenden Trommelsichtern. Eine allgemeingültige Regel läßt sich für die Auswahl der Sichter ebensowenig angeben wie für die Wahl der Zerkleinerer. Die Eigenart des Mahlgutes spricht das entscheidende Wort.

Das gleiche gilt für die Wahl der Förderanlagen. Den Vorzug verdienen solche Einrichtungen, bei denen das zu fördernde Gut relativ zur eigentlichen Transporteinrichtung ruht, das sind Förderbänder und Becherwerke. Auch staubdicht geschlossene Förderschnecken können mit Erfolg verwendet werden. Weniger geeignet wegen der Gefahr der Staubaufwirbelung sind alle die Einrichtungen, bei denen das Material durch periodisch ruckweise Bewegung der Transportanlage weiterbewegt wird, wie bei den sog. Schüttelrinnen. Die durch eine Summe von Impulsen erfolgende Fortbewegung des Gutes kann zur Staubaufwirbelung führen. Wesentlich ist auch hier, daß nur durch Sichtung weitgehend entstaubtes Gut gefördert wird. Die Bewegung des staubhaltigen Mahlgutes vom Zerkleinerer zum Sichter erfolgt zweckmäßig von oben nach unten durch kurze, geschlossene Rutschen oder von unten nach oben durch staubdicht geschlossene Becherwerke und in der Horizontalen allenfalls durch geschlossene Förderschnecken.

Die pneumatischen Förderanlagen beginnen sich vielfach größerer Beliebtheit zu erfreuen. Sie sind einfach und arbeiten wirtschaftlich. Für Stoffe mit kleiner Dielektrizitätskonstante (Isolatoren) können sie aber zur Gefahrenquelle werden. Die Möglichkeit ist nicht von der Hand zu weisen, daß durch die heftige Reibung der durch die Druck- oder Saug-

luft mit großer Geschwindigkeit bewerkstelligten Förderung beträchtliche elektrostatische Ladungen erzeugt werden, die unter explosionsgünstigen meteorologischen Bedingungen, wie Trockenheit und Wärme, zur Explosion führen können. Price und Brown (1) haben an einer kleinen Versuchsanlage bei nur intermittierender Luftförderung von Baumwolle Potentialdifferenzen von 800 Volt gemessen. Da durch Erdung nur ein Teil der bei der Luftförderung erzeugten elektrostatischen Ladungen entfernt wird (siehe S. 80), bedeuten selbst geerdete pneumatische Förderanlagen eine gewisse — wenn auch nicht große — Gefahr. Stoffe, die gute Isolatoren sind, wie z. B. Zucker, sollten darum besser nicht pneumatisch gefördert werden. F. Stollé (2) glaubt im Gegensatz zu Beyersdorfer (3) die Luftförderung für Zucker als ungefährlich ansprechen zu dürfen.

Eine wichtige Rolle bei der Bekämpfung des Staubes spielt das System der Entstaubungsanlagen. Diese Anlagen bezwecken, den Staub, das überzerkleinerte Gut, alsbald nach seiner Entstehung aus der Zerkleinerungsmaschine, der Siebvorrichtung oder dem Transportelement zu entfernen. Diesem Zwecke dient ein Ventilator (Exhaustor), der durch ein System von Rohren den allerfeinsten Staub aus den genannten Maschinen heraussaugt und schließlich nach einer Anlage befördert, in welcher der Staub entweder gesammelt, unschädlich gemacht oder vernichtet wird. Bei der Anlage eines derartigen Entstaubungssystems drängt sich die Frage auf: Zentralisation oder Dezentralisation?

Die Zentralisation hat verschiedene Nachteile. Wenn der ganze Staub einer Mühlenanlage nach einer einzigen Staubsammelanlage transportiert wird, so müssen sich in dieser in kurzer Zeit recht beträchtliche Mengen des allergefährlichsten Staubes ansammeln. Wenn in irgendeiner Mühlenmaschine es zu einer Teilexplosion kommt, so ist dieser durch das zusammenhängende System der Entstaubungsrohre, das strahlenförmig von der Staubsammelanlage nach den einzelnen Mühlenmaschinen geht, Gelegenheit geboten, durch Auslösung weiterer Teilexplosionen schließlich die ganze Mühlenanlage zur Explosion zu bringen.

Bei dezentralisierter Entstaubung wird eine Explosion auf einen viel kleineren Bereich beschränkt bleiben; sie wird in der Regel nur alles das heimsuchen, was eben an dem Entstaubungssystem hängt. Und wenn die Explosion bis zur Staubsammelanlage kommt, so wird sie bei dezentralisierter Entstaubung dort bei weitem nicht so viel gefährlichsten Staub vorfinden, wie bei zentralisierter. Dezentralisation beschränkt die Wirkung einer Staubexplosion.

Die eigentliche Arbeit der Entstaubung leistet der Exhaustor. Man soll nur saugende, niemals drückende Exhaustoren verwenden. Die Wahr-

scheinlichkeit der Verschmutzung der Lager durch Staub — also auch des Warmlaufens — ist beim Ventilator groß. Der saugende Exhaustor befindet sich am Ende der Entstaubung. Führt dort ein heißes Lager zur Entzündung des Staubes, dann kann kein großer Schaden mehr angerichtet werden. Beim drückenden Exhaustor würde das Gegenteil eintreten. Die Leistungsfähigkeit des Exhaustors muß den jeweiligen Betriebsverhältnissen genau angepaßt sein. Weder zu große noch zu kleine Saugwirkung ist zulässig. Die Luftbewegung und -förderung muß so abgestimmt sein, daß die Staubkonzentration im ganzen System der Entstaubung unterhalb der unteren Sicherheitsgrenze liegt. Um diese Staubkonzentration richtig zu bemessen, braucht man die Kenntnis der in der Maschine erzeugten Staubmenge. Nach dieser müssen die vom Exhaustor zu bewältigenden Luftmengen für die zulässige Luftgeschwindigkeit, wie auch die Querschnitte der Entstaubungsrohre berechnet werden.

Ein Zahlenbeispiel nach W. H. Geck (4) möge zur Erläuterung dienen. Ein Walzenstuhl, der stündlich 1500 kg gemahlenen Zucker liefere, erzeuge 2 % = 30 kg Staub. Dieser Staub muß weggesaugt werden, und zwar so, daß der Staubgehalt der weggesaugten Luft 17,5 g/m³, entsprechend 1,5 Gew.-%, nicht überschreitet. Um die 30 kg Staub in gerade noch ungefährlicher Konzentration wegzuschaffen, sind $100 \cdot \frac{30}{1{,}5} = 2000$ kg Luft nötig; diese entsprechen wiederum ca. 1700 m³. Diese Luftmenge muß mindestens stündlich aus dem Walzenstuhl des Beispiels abgesaugt werden. Soll diese Absaugung mit der für Zuckerstaub gültigen Erfahrungsgeschwindigkeit von 10 m/sec erfolgen, so muß der Querschnitt der Rohrleitung $q = \frac{1700}{3600 \cdot 10}$ m² = 470 cm² betragen; der Durchmesser der Rohrleitung also rechnerisch 245 mm und unter Berücksichtigung der Reibungswiderstände 255 mm.

Ferner ist wesentlich — und das findet man nicht in allen Betrieben berücksichtigt —, daß die Summe der Querschnitte der verschiedenen an einem Ventilator hängenden Rohrleitungen gleich ist dem Querschnitt des Sammelrohres vor dem Exhaustor. Wenn die Querschnitte nicht zueinander stimmen, dann wird die Entstaubung der verschiedenen Maschinen eines Entstaubungssystems nicht gleichmäßig erfolgen. Auch wird dann die Strömungsgeschwindigkeit in den nicht zueinander stimmenden Rohren verschieden sein.

Die Entstaubungsrohre sind möglichst steil zu führen. Ihre Neigung gegen die Horizontale sollte 60° nicht unterschreiten. Wenn ein Ent-

staubungsrohr erst auf-, dann abwärts geführt werden muß, soll der Winkel beim Knick, der möglichst scharf zu machen ist, nicht größer als ebenfalls 60° sein. Kurz: die Entstaubungsrohre sind so zu führen, daß Staubansammlungen in ihnen weitgehendst eingeschränkt werden (die Gefahr des ruhenden Staubes!).

Das schwierigste Problem ist das des Staubsammlers, der auch vielfach als die eigentliche Entstaubungsanlage bezeichnet wird. Der Exhaustor fördert den aus den Maschinen angesaugten Staub in diese Entstaubungsanlage. Hier sammelt sich schließlich der Staub in großen Mengen — bis zu vielen hundert Kilo — an und wird, wenn eine Explosion bis zu ihm gelangt, die Katastrophe auslösen.

Ihre Entstehung verdanken die Staubsammelanlagen ursprünglich wohl zwei Erwägungen: einer kaufmännischen und einer sozialen. Wertvollen Staub, dessen Herstellung meist Betriebszweck ist, kann man nicht verlorengehen lassen; und Staub überhaupt, wertvollen wie wertlosen, kann und darf man aus Gründen der Hygiene nicht in die freie Luft hinausblasen. Er muß also unter allen Umständen gesammelt, vernichtet oder unschädlich gemacht werden.

Die weiteste Verbreitung hatten — leider sind sie heute noch anzutreffen — die Staubkammern. Diese sind die explosionsgefährlichste Einrichtung zum Staubsammeln. Kommt die Explosionswelle hinein, so findet sie genügend Staub und Luft vor, um ein hochexplosibles Staub-Luftgemisch zu erzeugen. Da die Staubkammern meist irgendwo im Fabrikationsgebäude eingebaut sind, wird die letzte heftigste aus ihnen hervorgehende Teilexplosion die verhängnisvollsten Folgen haben müssen. Staubkammern sind grundsätzlich zu verwerfen wegen der großen Menge Staub und Luft, die sie gleichzeitig enthalten. Auch in den Staubkammern ist nicht der schwebende, sondern der ruhende, bereits abgesetzte Staub der gefährlichste. Hierfür ein interessanter Beleg: In der Staubkammer einer Zuckermühle brannten jahrzehntelang vier Leuchtgasflammen (Schnittbrenner); keine Explosion hat deshalb darin stattgefunden. Die Staubkammer wurde aber einmal zum Verhängnis, als eine Explosionswelle sie erreichte, die von einer sog. Pilé-Mühle ausgegangen war. Die angrenzenden Räume fielen der Explosion mit zum Opfer.

An Stelle der Staubkammern, die auf dem Prinzip des Absetzenlassens des Staubes als Folge verminderter Strömungsgeschwindigkeit beruhen, haben heute weite Verbreitung gefunden die Anlagen, die auf der Trennung von Staub und Luft beruhen: Fliehkraftabscheider (Zyklone) und Filter, wie Schlauch- und Sternfilter und die neuen Delbag-Filter, deren Wirkung darauf beruht, daß der Staub an großen benetzten Oberflächen — Prinzip

Raschig-Ringe — festgehalten wird. Alle diese Staubsammelanlagen haben entschieden vor den Staubkammern den Vorzug, daß in ihnen das Verhältnis Staub zu Luft ein explosionsungünstiges ist. Wenn in einer solchen Anlage der Staub aufgewirbelt wird, besteht die Möglichkeit, daß die Staubkonzentration oberhalb der oberen Explosionsgrenze liegt, daß also die Stichflamme der Explosion nicht mehr genügend Sauerstoff zur heftigen und vollkommenen Verbrennung des Staubes vorfindet. Das ist aber nur eine Möglichkeit mit geringer Wahrscheinlichkeit. Die Explosionsgefahr durch den ruhenden Staub — wenn er aufgewirbelt wird — bleibt immer bestehen. Aber in allen den Fällen, in denen der Staub aus wirtschaftlichen Gründen als solcher gewonnen werden muß, oder in denen es technisch unmöglich ist, den Staub z. B. durch Auflösen unschädlich zu machen, bleibt heute nichts weiter übrig, als in Filteranlagen wie den genannten den Staub abzuscheiden. Der Einbau dieser Anlagen hat aber dann so zu erfolgen, daß eine Explosion sich bequem, ohne Gefährdung der Nachbarschaft, am besten nach oben ins Freie fortpflanzen kann. Die Filter müssen dann explosionssicher ummauert sein und nach außen (oben) eine Druckwelle widerstandslos austreten lassen.

Eine wesentlich sicherere Entstaubung ist für alle die Stäube möglich, die in einem Lösungsmittel, aus dem der Stoff in wirtschaftlicher Weise wieder zu gewinnen ist, bei gewöhnlicher Temperatur aufgelöst werden können. Solche Stäube, die in der Regel chemisch einheitliche, wohl definierte Körper sein werden, wie z. B. Zucker, entfernt man am besten und sichersten aus der Luft mit Hilfe der nassen Entstaubung. Bei dieser wird durch den Exhaustor die Staubluft zunächst in einen Kasten gedrückt, der mit dem Lösungsmittel teilweise gefüllt ist. Auf diesem Kasten steht ein weites Rohr, in dem in mehreren Stockwerken in Abständen von etwa 50 cm ringförmig zahlreiche Düsen angebracht sind, aus denen das Lösungsmittel, gleichsam einen nach unten spitzen Flüssigkeitskegel bildend, dem Luftstrom entgegengeblasen wird. Je nach der Benetzbarkeit und Löslichkeit des Staubes wählt man 3, 6 und mehr Stockwerke. Das Lösungsmittel, das immer mehr Staub in Lösung aufnimmt, wird bis zum zulässigen höchsten Sättigungsgrad im Kreislauf aus dem Kasten durch die Düsen gepumpt. Da durch den Luftstrom Flüssigkeitströpfchen mitgerissen werden, empfiehlt es sich, die dieser Entstaubungsanlage entströmende Luft zur Vermeidung von Substanzverlusten nicht unmittelbar ins Freie hinaustreten zu lassen, sondern sie erst noch durch einen Fliehkraftabscheider zu schicken, in dem die Tröpfchen der Lösung gleichsam auszentrifugiert werden. Für Zucker haben sich derartige Anlagen — System Frankenthal — bewährt.

In Mühlen findet man häufig, daß die Ventilationsanlage, die zur Entstaubung der Maschinen dient, mit diesen zwangsläufig verbunden ist. Wenn die Maschine geht, geht auch der Ventilator; steht die Maschine, so steht auch der Ventilator. Diese Anordnung ist zu verwerfen. Der Ventilator muß seinen eigenen, von der Maschine unabhängigen Antrieb haben. Die größte Staubentwicklung tritt beim Anlassen der Maschine ein. Bei gleichzeitigem Anlassen von Maschine und Ventilator verstreicht geraume Zeit, bis die Staubabsaugung wirksam wird. Darum muß der Ventilator seinen eigenen Antrieb haben und vor dem Einrücken der Mahl- oder Sichtmaschine angelassen werden können. Auch während der Betriebspausen läßt man den Entstaubungsventilator zweckmäßig weiterlaufen. Der Ventilator soll in einer Mühle die erste Maschine sein, welche in Betrieb und die letzte Maschine, welche außer Betrieb gesetzt wird.

Um dem durch die Explosionsdruckwelle aufgewirbelten Staub seine Zündfähigkeit zu nehmen, sind Einrichtungen in Gebrauch genommen worden, die bezwecken, seine Konzentration bis unter die untere Explosionsgrenze herabzudrücken. Es ist dies das sog. Gesteinsstaubverfahren. Praktische Anwendung und größte Verbreitung hat es in den Steinkohlenbergwerken gefunden. Große an der Decke hängende Kästen u. dgl. sind locker mit Gesteinsstaub gefüllt. Kommt die Druckwelle der Explosion, so wird der unbrennbare Gesteinsstaub aufgewirbelt. Er vermischt sich mit dem brennbaren Staub, dessen Konzentration so stark erniedrigend, daß er nicht mehr explosibel ist. Wie explosiblen Gasgemischen durch Zusatz inerter Gase die Explosionsfähigkeit genommen werden kann, so können auch explosible Staub-Luftgemische durch entsprechende Beimengung von inertem Gesteinsstaub ungefährlich gemacht werden.

Um den in den Bergwerken ruhenden und infolge der Bewetterung meist trockenen, also leicht aufzuwirbelnden Kohlenstaub unschädlich zu machen, ist vorgeschlagen worden, Chlorkalzium zu streuen (5). Chlorkalzium ist sehr stark wasseranziehend, ein leicht zerfließliches Salz. Durch das vom Chlorkalzium angezogene Wasser soll auch der Kohlenstaub angefeuchtet und gewissermaßen klebrig gemacht werden, so daß die Explosionswelle nicht mehr in der Lage ist, ihn aufzuwirbeln. So hat man versucht, sich in Steinkohlenbergwerken gegen die Gefahr des ruhenden Staubes zu schützen: da man ihn nicht entfernen kann, sucht man ihn zu binden.

In den Mühlenbetrieben gibt es nur einen Schutz gegen den außerhalb der Maschinen ruhenden bzw. sich absetzenden Staub: Sauberkeit. Kurzperiodische gründliche Reinigung aller Maschinen und Rohrleitungen, von

Balken, Trägern, Geländern, Decken und Böden ist unerläßlich. Durch entsprechende Bemessung der Räume kann die Gefährlichkeit dünner Staubschichten an den Wänden vermindert werden. Die Schaffung langer, gangähnlicher Räume ist zu vermeiden. Die Würfelform ist für einen dem Staub ausgesetzten Raum als ideal anzustreben (s. S. 104).

2. Die Bekämpfung der Energie.

Der Kampf gegen den Staub kann begreiflicherweise nicht als Vernichtungskrieg geführt werden. Man muß sich damit begnügen, ihn nicht überhandnehmen zu lassen. Wo gehobelt wird, da fliegen Späne, wo gemahlen wird, da wirbelt Staub. Eine andere Taktik kann der Energie gegenüber eingeschlagen werden. Hier kann das Ziel praktisch nahezu auf Vernichtung gesteckt werden. Der Faktor Energie des Explosionsprodukts: Staub × Energie × Sauerstoff muß als die eigentliche Wurzel des Übels Staubexplosion — mit Staub und Luft (Sauerstoff) muß man sich leider mehr oder weniger abfinden — möglichst gründlich ausgerottet werden. Und das ist auch sehr weitgehend möglich. Es ist zwar nicht leicht, mit Sorgfalt und menschlicher Energie muß es aber gehen.

a) Der Kampf gegen die Wärme.

Hantieren mit offenen Lichtern — Kerzen, Öllampen, Azetylenlampen u. dgl. —, auch mit Zündhölzern, Feuerzeugen (Rauchen!) sowie mit Lötlampen, Schweißapparaten ist in stauberzeugenden Betrieben, wenigstens solange diese im Gang sind oder noch Staub als der übliche ruhende Staub sich in ihnen vorfindet, unbedingt zu verbieten. Wenn beispielsweise Reparaturen, bei denen geschweißt werden muß, in einem solchen Betrieb vorzunehmen sind, darf weder Staub noch feines Mahlgut, auch in abgesacktem Zustand, sich in dem betreffenden Raum befinden. Durch geplatzte Säcke, deren Inhalt den Raum zum Teil mit einer Wolke gefährlicher Dichte erfüllt hat, ist schon manche Explosion verursacht worden.

Als Kuriosum, das die Gefährlichkeit selbst kleiner Staubwolken zeigt, sei hier die wohl einzige, einstmals praktisch geübte Anwendung der Explosionsgefährlichkeit von Staub einflechtend erwähnt. Prof. Weber (4), Berlin, schreibt 1878:

„Die Bäcker pflegen sich in den Backstuben der Fliegen und der Schwaben auf die Weise zu erledigen, daß sie scharf getrocknetes Mehl in die Luft werfen und die Mehlstaubwolke entzünden. — Der Besitzer einer hiesigen Bäckerei erzählte dem Verfasser, es sei bei einem solchen

von ihm ausgeführten Verfahren — wohl wegen Anwendung einer zu großen Menge Mehls — eine erschreckend heftige Wirkung eingetreten und das Fenster der Backstube herausgeschleudert worden."

Als Beleuchtung ist nur die elektrische zulässig. Die Birnen müssen aber mit starken, dickwandigen Schutzglocken, die wiederum durch Drahtgeflechte gegen Zertrümmerung geschützt sind, umgeben sein; aber nicht nur die ortsfest angebrachten Glühlampen, auch die an Kabeln für besondere Zwecke transportablen Lampen erst recht. Bei diesen ist die Gefahr des Zertrümmertwerdens ungleich viel größer als bei jenen.

Alle elektrischen Leitungsdrähte müssen in Stahlpanzerrohren verlegt sein. Die gewöhnlichen Rohre können bei Kurzschluß durchbrennen. Die elektrischen Leitungen sind vor Erdschluß und Überlastung zu bewahren (siehe S. 63).

Im eigentlichen Mühlenraum dürfen keine Elektromotore stehen. Die Antriebsmotoren, welche außerdem staubdicht gekapselt sein müssen, sind in vom Mühlenraum getrennten Gelassen unterzubringen. Die Hauptantriebswelle darf aber vom Motorenraum nicht einfach durch eine Maueröffnung in den Raum der Arbeitsmaschinen gehen; sie wird zweckmäßig durch ein eingemauertes Lager geführt.

Die Bildung gefährlicher Wärmemengen an und in den Arbeitsmaschinen kann hintangehalten werden durch sorgfältige Wartung und Beobachtung der Maschinen durch das Personal, dem die Überwachung durch technische Einrichtungen zu erleichtern ist.

Um rechtzeitig das Heißlaufen von Lagern zu erkennen, kann in einer Lagerschale eine Temperaturmeßeinrichtung angebracht werden, durch welche, sobald eine gewisse Temperatur erreicht ist, ein Schall- oder Lichtzeichen ausgelöst wird. So kann z. B. ein Quecksilberthermometer angebracht werden, in dessen Kapillare bei 50° C zwei Platindrähte eingeschmolzen sind. Diese Platindrähte sind in den Stromkreis einer elektrischen Klingelleitung eingeschaltet. Sobald der Quecksilberfaden bis 50° gestiegen ist, wird Kontakt hergestellt, der Stromkreis geschlossen und das Klingelzeichen ertönt als Warnungssignal.

Die Wärme, die in der Zerkleinerungsmaschine durch Reibung bewegter Maschinenteile aneinander entwickelt werden kann, wird am sichersten durch sorgfältige Betriebsführung und Überwachung so rechtzeitig erkannt, daß sie nicht zur Gefahrenquelle wird. Einmal ist wegen der großen Wärmekapazität der Maschinenteile ein Erhitzen derselben auf etliche hundert Grad in sehr kurzer Zeit nicht möglich, zum andern muß bei einiger Aufmerksamkeit das Personal am Geräusch erkennen, daß etwas nicht in Ordnung ist.

Auch durch die Wahl geeigneter Zerkleinerungsmaschinen kann die eben genannte Gefahr auf ein Minimum reduziert werden. Wo es nicht unbedingt nötig ist und einen anderen Ausweg gibt, sollte man z. B. Riffelwalzenstühle und mit großer Geschwindigkeit umlaufende Schlagbolzenmühlen durch beispielsweise Walzenstühle mit glatten Walzen und langsamer laufende Schlagbolzenmühlen ersetzen. Wenn einmal zwei glatte Walzen sich aneinander reiben sollten, ist die Wärmeentwicklung bei weitem nicht so groß, als wenn dies Riffelwalzen tun, die womöglich noch verschiedene Durchmesser bei unterschiedlicher Riffelung haben. Und wenn eine Schlagbolzenmühle bei 600 Umdrehungen/min durch Lockerung und Verbiegen eines Stiftes abgebremst wird, ist die Bewegungsenergie, die sich in Wärme verwandelt, bei weitem nicht so beträchtlich, als wenn die Mühle einige tausend Umdrehungen/min machen würde.

Die Funkenbildung durch eiserne Fremdkörper (Nägel, Schraubenmuttern, Bolzen u. dgl.) — und solche kommen hauptsächlich nur in Frage — kann dadurch ausgeschaltet werden, daß man das Mahlgut, ehe es in eine Maschine gelangt, starke Magnete passieren läßt. Solche Enteisenungsmagnete dürfen schon im Interesse der Erhaltung der Maschine an keinem Zerkleinerer fehlen. Das Funktionieren der Magnete muß durch farbige, an übersichtlicher Stelle im Raum angebrachte und entsprechend in den Stromkreis eingeschaltete elektrische Lampen überwacht werden. Solange der Magnet unter Strom steht — also magnetisch ist —, bekommt auch die Lampe Strom und leuchtet. Eine nicht leuchtende Lampe zeigt an, daß der ihr zugeordnete Magnet außer Betrieb ist. Jeder Magnet muß seine Signallampe haben.

Daß Steine und andere Fremdkörper, die auch nicht magnetisch sind, nicht in die Mahlmaschine gelangen, kann nur durch größte Sorgfalt und Sauberkeit (entsprechende Erziehung der Belegschaft) verhütet werden.

Des weiteren kommt noch als zu bekämpfende Wärmeenergiequelle die pyrophore Kohle in Frage. Dadurch, daß man dafür Sorge trägt, daß Dampfleitungen — auch an den Flanschen — gut isoliert sind, macht man die Entstehung pyrophorer Kohle aus dem aufliegenden Staub unmöglich. Wo dennoch kleine Dampfleitungsstücke aus irgendwelchen Gründen nicht isoliert werden können (Ventile!), sind sie durch häufige Reinigung staubfrei zu halten. Die mit Schutzglocken versehenen elektrischen Glühlampen gestatten auch nicht mehr die bei den ungeschützten Birnen mögliche Bildung pyrophorer Kohle aus organischem Staub.

Schließlich sei noch einer eigenartigen, aber einwandfrei festgestellten Explosionsursache gedacht, die zeigt, daß man sogar den Glasdächern

auf Mühlengebäuden Beachtung schenken muß (7). Im Jahre 1870 entstand in einer rheinischen Mühle im Innern eines auf dem Dachstockwerke aufgestellten Beutelkastens ohne äußere Veranlassung Feuer, wodurch der Beutelbezug zerstört, das Ende der Transportschnecke stark angekohlt und das Gehäuse des Siebwerkes vernichtet wurde. Nach langem Rätselraten konnte nachgewiesen werden, daß in einem Glasdachziegel eine Blase war, in deren Brennpunkt der entzündete Mehlzylinder stand; von diesem kleinen Herde aus erfolgte die Mehlstaubentzündung.

b) Der Kampf gegen die statische Elektrizität.

Ihrer Entstehung nach müssen zwei Arten statischer Elektrizität unterschieden werden, staubfremde und staubeigene: Riemenelektrizität und Staubelektrizität.

Die Bildung von Riemenelektrizität kann nach M. M. Richter (8) verhindert werden durch Bestreichen der Riemen mit einer Lösung von Wasser und Glyzerin 1 : 1. Das hygroskopische Glyzerin hält den Riemen feucht und macht ihn so dauernd zu einem Leiter der Elektrizität. Selbst wenn die Riemenscheiben, über die der Riemen läuft, isoliert sein sollten durch die Art der Aufstellung oder durch isolierende Ölhäutchen, kann es bei elektrisch leitendem Riemen nicht zur Elektrizitätstrennung und zum darauffolgenden Ausgleichsvorgang kommen. — Auch durch Graphitierung der Treibriemen soll die Bildung getrennter elektrostatischer Ladungen verhindert werden.

In Amerika sind zwei verschiedene Vorrichtungen herausgebildet worden, um elektrostatische Ladungen auf Treibriemen unschädlich zu machen.

1. Auf beiden Seiten des Treibriemens wird gleichlaufend mit diesem in $^3/_4$ Zoll Abstand eine Schar paralleler Kupferdrähte, die unter sich leitend verbunden und geerdet sind, angebracht, und zwar in der ganzen Länge und Breite des Riemens.

2. Unmittelbar dort, wo der Riemen die Riemenscheibe verläßt — also gerade die Elektrizitätstrennung stattgefunden hat —, wird ein geerdeter Schleifkontakt angebracht. Nach Anbringung dieser Vorrichtungen konnten keine Ladungen mehr festgestellt werden auf Treibriemen, die ohne diese Vorrichtungen Potentialdifferenzen von mehreren 10000 Volt aufwiesen.

Schwieriger ist die dem Staub eigene Elektrizität zu entfernen. Ein Teil dieser Elektrizität wird wohl bei Berührung mit dem Metallgehäuse der Maschinen — Mühlen, Sichter, Förderanlagen — an dieses abgegeben. Dieser abgegebene Teil der Ladung kann verhältnismäßig leicht durch

Erdung entfernt werden. Die Erdung muß aber sehr sorgfältig durchgeführt werden. Eine Maschine ist noch lange nicht geerdet dadurch, daß sie auf dem Erdboden steht. Übrigens steht die Maschine in der Regel auf einem Stein- oder Betonfundament. Und Stein und Beton sind keine guten Leiter und werden noch schlechtere Leiter, wenn sie — was häufig der Fall ist — mit abgetropftem Maschinenöl getränkt sind. Es ist darum unbedingt notwendig, daß an der Maschine, in innigem Kontakt mit dieser, ein Ableitungsdraht für die Elektrizität angebracht wird, der über den Blitzableiter oder die Wasserleitung zu erden ist, wofern man es nicht vorzieht, ihn selbst bis zum Grundwasserspiegel in die Erde hineinzuführen. Bei sandigem oder felsigem Untergrund, wo der Grundwasserspiegel großen Schwankungen unterworfen oder schwer zu erreichen ist, muß der Erdung erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Aber selbst, wenn das Maschinengehäuse geerdet ist, können die bewegten Teile der Maschine immer noch isoliert sein. Das Schmieröl der Lager kann — namentlich wenn frisch geölt worden ist — die bewegten Maschinenteile vollkommen isolieren. Darum sind auch an den Wellen geerdete Abnahmekontakte (Kupferringe mit Schleifbürsten) anzubringen. Diese einfachen Einrichtungen haben sich bereits in Amerika bestens bewährt (siehe S. 71 ff.).

Durch die Erdung der Maschinenteile wird aber nur ein Teil der Gefahr gebannt. Dem eben entstehenden, dem naszierenden und am stärksten elektrisch geladenen Staub, der noch keine Gelegenheit hatte, mit einem Metallteil der Maschine in Berührung zu kommen, wird durch die Erdung der Maschine seine Ladung noch nicht genommen; er ist immer noch gefährlich durch die in ihm wohnende Energie.

Diese elektrische Energie kann dem Staub auf verschiedene Arten entzogen werden, die alle auf das Prinzip der Ableitung hinauslaufen. Man kann den Staub zwingen, möglichst bald nach seiner Entstehung mit blanken geerdeten Leitern der Elektrizität in Berührung zu kommen, so daß er über diese seine Ladung abgeben muß. Solche Vorrichtungen — Elektroden vom Erdpotential Null — können nur bei wenigen Zerkleinerungsmaschinen, wie Walzenstühlen, einigermaßen wirksam angebracht werden. Die Schwierigkeit besteht darin, die Elektroden nahe genug an den Ort der eigentlichen Zerkleinerung heranzubringen. Wenn ihre Schutzwirkung deshalb auch keine absolute sein kann, so verringern sie immerhin durch Fortführung elektrostatischer Ladungen die Gefahr ganz beträchtlich.

Die Hauptexplosionsgefahr sitzt am Ort der eigentlichen Zerkleinerung, wo Staub und Energie in höchster Dichte gleichzeitig vorhanden

sind. Mit einem metallischen Konduktor kann man aus technischen Gründen nicht bis dorthin gelangen, kann man die eben erzeugte elektrostatische Staubladung nicht sofort nach ihrer Entstehung dem unersättlichen Potential der Erde zuführen. Nur ein Medium ist dazu imstande: die Luft. Aber nicht die gewöhnliche Luft; die ist ein ausgezeichneter Isolator. Nur Luft mit elektrischer Leitfähigkeit vermag selbst die jüngsten, frischesten Staubladungen fortzuführen.

Dieses Teilproblem zur Verhütung von Staubexplosionen lautet in anderer Lesart: Wie macht man die Luft in der Mühle zu einem Leiter?

Es ist bekannt, daß feuchte Luft die Elektrizität ungleich viel besser leitet als trockene. Wo es das Mahlgut und die Staubart zuläßt — nur selten wird es der Fall sein —, ist ein hoher relativer Feuchtigkeitsgehalt in der ganzen Mühlenanlage anzustreben, ähnlich wie in Spinnereien.

Wo man nicht mit Hilfe von Wasserdampf die Luft elektrisch leitend machen kann, steht noch der Weg offen, sie zu ionisieren. Die theoretischen Möglichkeiten hierzu sind mannigfach, die praktischen aber beschränkt. Hier bietet sich der Technik noch ein großes Betätigungsfeld.

Man kennt die ionisierende Wirkung — mit anderen Worten die Fähigkeit, die Luft leitend zu machen — von Flammengasen und den verschiedenen Arten von kurzwelliger Strahlung, wie z. B. von ultraviolettem Licht, Röntgenstrahlen und der Strahlung radioaktiver Stoffe. Gelingt es, der Mühlenmaschine fortgesetzt auf irgendeine Art ionisierte Luft zuzuführen — etwa durch den Entstaubungsventilator ionisierte Luft ansaugen zu lassen — oder von außen her die Luft in der Maschine elektrisch leitend zu machen etwa dadurch, daß man durch ein Quarzfenster ultraviolette Strahlen eintreten läßt oder daß man radioaktive Stoffe an geeigneter Stelle in der Maschine anbringt, so wird man die elektrische Ladung der Staubteilchen unmittelbar nach ihrer Entstehung durch Ableitung unschädlich machen können. Dies dürfte der zuverlässigste Weg zur Vernichtung der gefährlichen elektrostatischen Energie sein.

3. Die Bekämpfung des Sauerstoffs.

Daß unter Ausschluß von Sauerstoff keine Staubexplosion entstehen kann, ist eine Selbstverständlichkeit. Unter Ausschluß von Sauerstoff aber in einem zusammenhängenden Mühlenbetriebe zu arbeiten, das ist eine technische Schwierigkeit, die nicht leicht zu überwinden sein dürfte. B. Block (9) hat den Vorschlag gemacht, „in den Mühlen unter vollständiger Luftleere zu arbeiten", wie es mit Erfolg schon in der Vakuumkolloidmühle geschehe. Vollständiger Ausschluß von Sauerstoff — Mahlen

im Vakuum oder in einer Sphäre, die nur aus inerten Gasen besteht — ist zur Verhinderung einer Staubexplosion gar nicht nötig. Es genügt vielmehr schon, den Sauerstoffgehalt der Luft zu ½ bis ⅔ durch träge Gase, wie Stickstoff und Kohlensäure, zu ersetzen, um die Explosionsgefahr auszuschließen. Für Zuckerstaub hat Beyersdorfer gezeigt, daß bei Sauerstoffgehalten unter 9% keine Explosion mehr, höchstens schwache Verbrennung, eintritt, und daß bei Sauerstoffgehalten unter 6% selbst bei Temperaturen von nahezu 500° auch keine Verbrennung mehr möglich ist (siehe S. 43).

H. W. Frevert (10) hat festgestellt, daß an einem 1200° heißen Glühdraht in dem von ihm modifizierten Clement-Frazer-Apparat in Mischungen von Luft mit Kohlensäure Schwefelstaub bei einem Sauerstoffgehalt unter 8,5% und Hartgummistaub bei einem Sauerstoffgehalt unter 13% nicht mehr explodierten.

Die Großversuche amerikanischer Forscher (11) haben ergeben, daß bei Sauerstoffgehalten von weniger als 14% Mehl-, Stärke- und Dextrinstaubexplosionen unmöglich sind. Sie haben ihre Versuche in großem Maßstabe mit entstaubten und durch Waschen in einem koksgefüllten Skrubber von der schwefligen Säure befreiten Rauchgasen durchgeführt und gleichzeitig durch Backversuche gezeigt, daß das Mehl, das durch Mahlen in der Sphäre gut gereinigter Rauchgase hergestellt war, einwandfreies Brot liefert.

Gegen den Vorschlag, in inerter kohlensäurehaltiger Sphäre zu arbeiten, sind Bedenken geäußert worden wegen der möglichen Gefährdung der Arbeiter durch etwa in den Arbeitsraum austretende Kohlensäure, wobei von der Annahme ausgegangen wird, daß das inerte Gas der Mühle unter einem gewissen Überdruck zugeführt werden muß (9).

Verfasser möchte diese Bedenken nicht teilen. Auch Price und Brown, welche bereits ein Schema für das Arbeiten in einer Sphäre gereinigter Rauchgase angegeben haben, sind anderer Ansicht. Wenn das Gas gleichzeitig mit dem Mahlgut in das geschlossene System zusammengehöriger, an einer Ventilationsanlage hängender Mühlenmaschinen eintritt, so steht es in der ganzen Anlage unter dem durch den saugenden Ventilator erzeugten Unterdruck einiger Zentimeter Wassersäule. Eine Gefährdung der Arbeiter durch ausströmendes Gas erscheint bei dieser Arbeitsweise ausgeschlossen. Es besteht vielmehr die Möglichkeit, daß wegen des in der ganzen Anlage herrschenden Unterdruckes durch Undichtigkeiten in dem zusammenhängenden System von Mahlmaschinen, Sichtern, Förderanlagen und Rohrleitungen Luft eingesaugt wird, welche den Sauerstoffgehalt des trägen Gases erhöht.

Ein Nachteil der Rauchgase ist ihr oft unangenehmer Geruch, der sich auch durch gründliches Waschen meist nicht ganz beseitigen läßt. Darum wird die Verwendung von Rauchgasen beim Vermahlen von Stoffen, die der menschlichen Ernährung dienen und die häufig die Eigenschaft haben, fremde Gerüche leicht anzunehmen und hartnäckig festzuhalten, auf begreiflichen Widerstand stoßen. Bei vielen Stoffen, die nur technische Verwendung finden und die nicht mit der Kohlensäure chemisch reagieren, sollte zur Verhütung von Explosionen von den billig zu reinigenden Rauchgasen Gebrauch gemacht werden.

Hochwertige organische Stoffe — Farbkörper u. dgl. —, deren Vermahlung heute oft in Kugelmühlen vorgenommen wird, können, wofern ihr Staub zur Explosion neigt, ohne besonderen apparativen und prozentualen Kostenaufwand in einer inerten Gassphäre zerkleinert werden: man verdrängt durch Einleiten des inerten Gases — Stickstoff oder Kohlensäure — den größten Teil der Luft.

Bei Stoffen, die den zu ihrer nahezu vollkommenen Verbrennung notwendigen Sauerstoff bereits chemisch gebunden enthalten, kann begreiflicherweise das Mahlen in inerter Gassphäre nur explosionsmildernd, aber nicht -hindernd wirken.

Es ist auch vorgeschlagen worden, trockenen Wasserdampf gleichsam als inertes Gas zu verwenden. Wegen des durch die Abkühlung alsbald eintretenden Naßwerdens des Wasserdampfes dürfte dieser Vorschlag kaum Anklang in der Technik finden.

4. Die räumliche Beschränkung von Staubexplosionen.

Eine Mühlenanlage soll so errichtet und eingerichtet sein, daß eine einmal entstandene Lokalexplosion keine verheerenden Ausmaße annehmen kann. Darum soll das Mühlengebäude möglichst frei stehen, große Fenster und ein durch Innendruck leicht abhebbares Dach haben. Zerkleinerungsmaschinen sollten niemals im Kellergeschoß stehen. Wenn es irgendwie angängig ist, sollten in mehrstöckigen Gebäuden keine durchgehenden oder massiven Zwischenböden gewählt werden. Säulengetragene Umgänge, welche im Innern des Gebäudes gleichsam einen Lichthof frei lassen, sollten an deren Stelle treten. Es ist ratsamer, die Fabrikation auf mehrere frei stehende Gebäude, je nach dem Grade der bestehenden Explosionsgefahr, zu verteilen, als sie in einem großen, zusammenhängenden Gebäudekomplex vorzunehmen. Wenn es zur Explosion kommt, wird dann nur ein Teil, nicht aber das Ganze betroffen.

Dem Zweck der Eindämmung und Beschränkung der Wirkung einer Staubexplosion dient die bereits behandelte Entstaubung (Einschränkung der Gefahr des schwebenden Staubes), wie auch die zweckmäßige Wahl der Staubsammler und die richtige Dimensionierung der Räume (Verminderung der Gefahr des ruhenden Staubes). Die ganze Mühlenanlage sollte so beschaffen sein, daß eine bereits entstandene Explosion am Weiterfortschreiten gehindert oder doch bald in den freien Raum hinaus abgeleitet wird. Eine Reihe von Einrichtungen sind hierzu ersonnen worden. Bereits Weber (12) empfiehlt die Einschaltung weitmaschiger Drahtgewebe in den Staubstrom. Er hat experimentell festgestellt, daß schon Eisengewebe von 6 bis 7 Fäden auf 1 cm Länge die Durchzündung von Reis- und Mehlstaub in den meisten Fällen hinderte. Ein Messingdrahtgewebe von etwa 10 Fäden auf 1 cm Länge in einen Staubstrom eingeschaltet,

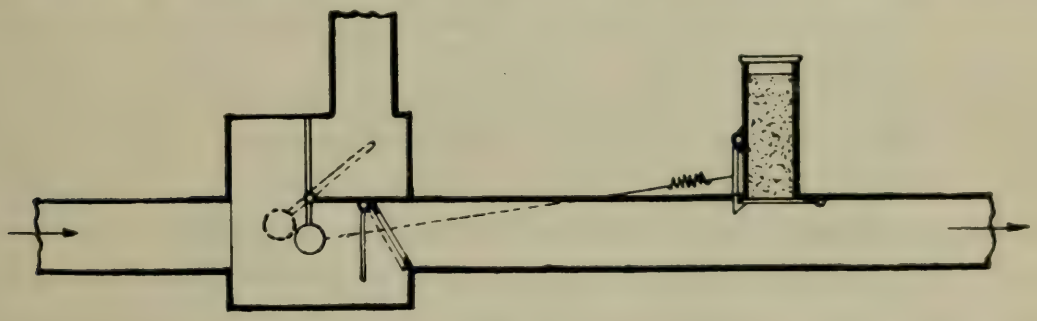


Fig. 13.
Schutzvorrichtung: Kombination von Explosionsklappe mit Gesteinsstaubverfahren.

ließ in keinem Fall die Zündung fortschreiten. Das Metall wirkt zu stark abkühlend. Eine solche Vorrichtung muß aber bei Explosionsflammen großen Wärmeinhalts versagen, weil ihre Wärmekapazität dann relativ zu klein wird.

Zweckmäßiger ist die Einrichtung von Explosionsklappen und -schloten. Durch den Druck oder die Erschütterung der Explosion wird durch die Klappe das Rohr oder die Maschine abgeschlossen, so daß die Explosionsflamme, die das Bestreben hat, dem Zuge der Entstaubung zu folgen, nicht mehr weiter fortschreiten kann. Sie wird sich einen Weg geringeren Widerstandes suchen, und den findet sie ins Freie durch den Explosionsschlot, der oben nur durch einen leichten, von innen nach außen aufstoßbaren Klappdeckel verschlossen ist. Vor jeder Explosionsklappe muß sich ein Explosionsschlot befinden.

Eine Vereinigung zu gemeinsamer Wirkung von Explosionsklappe und Gesteinsstaubverfahren ist in den deutschen Patenten Nr. 218717 und Nr. 221637 beschrieben (Abb. 13).

Hinter dem Explosionsschlot sitzt z. B. auf dem Entstaubungsrohr ein mit unbrennbarem Staub gefüllter Kasten. Die durch ein Gewicht ausbalancierte Drehklappe, welche normalerweise den Explosionsschlot unten verschlossen hält, steht derart in Verbindung mit dem Klappenverschluß des Staubkastens, daß, wenn durch den Explosionsdruck die Schlotklappe geöffnet wird, zwangsläufig sich auch die Klappe des Staubkastens öffnen muß, so daß der Gesteinsstaub des Kastens sich durch seine eigene Schwere in das Entstaubungsrohr des Beispiels entleeren muß. Zur weiteren Sicherheit ist noch zwischen Staubkasten und Explosionsschlot eine Explosionsklappe angebracht. Price und Brown (13) haben 50 Versuche mit Stärkestaub in einer nach der Patentangabe gebauten Versuchsanlage durchgeführt und ausnahmslos feststellen können, daß durch die Vorrichtung die Explosion am Weiterfortschreiten verhindert wurde. Wenn sie nur die Explosionsklappe ohne inerten Staub im Kasten arbeiten ließen, konnten sie nur in einigen Fällen beobachten, daß ein kleiner Teil der Explosionsflamme das Sicherungssystem passierte; der größere Teil ging durch den Explosionsschlot ins Freie. — Diese Versuche zeigen erstens die dämpfende Wirkung der Explosionsklappen in Kombination mit Schloten und zweitens die praktische Möglichkeit, das in den Steinkohlenbergwerken mit Erfolg verwendete Gesteinsstaubverfahren mit gleichem Erfolg in geeigneter Anpassung für industrielle Anlagen zu übernehmen.

Bewährt haben sich in Mühlen wie in anderen feuergefährdeten Betrieben die Sprinkleranlagen. Eine Sprinkleranlage besteht aus einem durch eine entsprechend verzweigte Rohrleitung gespeisten, vorwiegend an den Decken der zu schützenden Räume angebrachten System von Wasserauslaßvorrichtungen, Feuerlöschbrausen oder Sprinkler, welche die Eigenschaft haben, sich bei Erwärmung auf eine gewisse Temperatur — in der Regel 70° C — durch Abschmelzen einer leicht schmelzbaren Metallegierung zu öffnen und das Wasser in einem allseitig sich ausbreitenden Sprühregen austreten zu lassen. Daneben erfüllt aber eine solche Anlage auch noch den Zweck einer selbsttätigen Alarmvorrichtung, indem die Bewegung des Wassers im Rohrnetz, welche durch Öffnung auch nur einer einzigen Brause hervorgerufen wird, sofort die Ingangsetzung eines Läuteapparats bewirkt.

Man verwendet zwei Arten von Sprinkleranlagen: das Naßsystem und das Trockensystem. Beim Naßsystem ist das ganze Rohrnetz beständig mit unter Druck stehendem Wasser gefüllt. Beim Trockensystem, das überall da zu wählen ist, wo Frostgefahr besteht, wo also im Winter ungeheizte Räume zu schützen sind, ist das Rohrnetz mit unter angemessen erhöhtem Druck

stehender Luft gefüllt. Diese strömt, sobald ein Sprinkler sich öffnet, zunächst aus und das unter etwas höherem Druck stehende Wasser drängt nach.

Henne (14) betont aber mit Recht, daß trotz der vorzüglichen Bewährung von Sprinkleranlagen bei Mühlenbränden man „nicht vergessen darf, daß eine Mehlstaubexplosion durch Zerstören der Leitungen den ganzen Schutz in einem Augenblick illusorisch machen kann".

5. Die Erziehung des Personals.

Menschen und Maschinen müssen in jedem Betrieb harmonisch zusammenspielen. Was nützt die vollkommenste maschinelle Einrichtung, wenn sie der Mensch nicht zu warten, zu pflegen und zu meistern versteht! — In explosionsgefährdeten Betrieben ist darum die Erziehung des gesamten darin beschäftigten Personals zu Leuten, welche die Tücken und Gefahren der Maschinen und Stoffe kennen, mit denen sie umzugehen haben, die erste Pflicht: im Interesse der Betriebe ebenso sehr wie im Interesse der Belegschaft.

Wie viele Explosionen haben aus reiner Fahrlässigkeit, aus Leichtsinn von Arbeitern stattgefunden! — Wie viele Explosionen hätten verhütet werden können, wenn nur ein Mann von einem seiner Sinne rechtzeitig und richtig Gebrauch gemacht hätte! — Was nützt die Signallampe zum Magneten, wenn sie nicht beachtet wird? — Aus Unkenntnis der Staubexplosionsgefahr ist schon mancher in den Tod hineingetaumelt, viele andere mit sich reißend.

Belehrung und Aufklärung des Personals über die ihm durch eigene Unachtsamkeit drohenden Gefahren muß in wirksamer Form erfolgen. Nicht durch eine Unzahl klein und eng gedruckter toter Paragraphen, die kein Mensch liest und, wenn er sie wirklich lesen sollte, doch kaum versteht! Lebendig, anschaulich, durch wirksame Bilder — Klebzettel — mit knappen, eindringlichen Mahnworten muß die Belehrung erfolgen. Von den U. S. A. — Innen- und Landwirtschaftsministerium — ist in dieser Art Vorbildliches geleistet worden. (Siehe Fig. 14.)

Ist die Belegschaft einer Mühle in leicht faßlicher Form belehrt, hat sie das Belehrungsmittel ständig vor Augen und kommen dennoch sträfliche Unachtsamkeiten vor, dann muß aber auch rücksichtslos, aus Rücksicht auf die anderen und den Betrieb gegen den Säumigen vorgegangen werden.

Eine verständig herangebildete Belegschaft ist mit der beste Schutz gegen die Staubexplosionsgefahr.

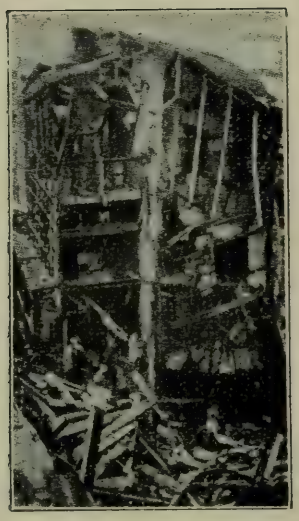
Hütet euch

vor

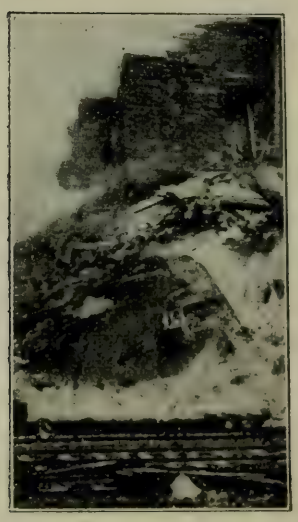
Staubexplosionen!

Ihr verliert

sonst



Gut und Leben



Brot und Arbeit.

Fig. 14.
Erzieherisch wirkendes Plakat nach einem amerikanischen Vorbild.

Literatur.

1) Dust Expl., S. 145.
2) F. Stolle: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 72 (1922), S. 713.
3) Beyersdorfer: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 72 (1922), S. 527 u. S. 785.
4) W. H. Geck: Die gefahrlose neuzeitliche Zuckermüllerei. Selbstverlag, Worms 1923, S. 49.
5) U. S. Bureau of Mines, Bull. 167, S. 405.
6) R. Weber: Verh. Ver. Beförderung Gewerbefleiß. 1878, S. 87.
7) van den Wyngart: Mühle 1871, Nr. 3.
8) M. M. Richter: Chem. Ztg. 1907, S. 1255.
9) B. Block: Ztschr. Ver. Dtsch. Zuck.-Ind. 74 (1924), S. 59.
10) H. W. Frevert: Chem. Metallurg. Eng. 31 (1924), Nr. 23.
11) Dust Expl., S. 93.
12) l. c. 6, S. 95.
13) Dust Expl., S. 106.
14) Henne: Beurteilung der Gefahren bei der Feuerversicherung. E. S. Mittler & Sohn, Berlin 1910, S. 209.

Weitere Literatur über Staubexplosionen ist zu finden:

1) U. S. Bureau of Mines, Bull. 167, S. 591—625.
2) Dust Expl., S. 241—246.

Nachtrag.

Während der Drucklegung des Buches ist erschienen:
The Dust Hazard in Industry. By William E. Gibbs, D. Sc. London: Ernest Benn Ltd. 1925. XII. u. 168 S. 11,5×18 cm.

Das Buch enthält keine neuen Gesichtspunkte zum Problem der Staubexplosion.

VERLAG VON THEODOR STEINKOPFF, DRESDEN UND LEIPZIG

TECHNISCHE FORTSCHRITTSBERICHTE

Fortschritte der chemischen Technologie in Einzeldarstellungen

Herausgegeben von
Prof. Dr. B. RASSOW, Leipzig.

Band I: BAUER, Dipl.-Ing. E. P., **Keramik.** XII und 143 Seiten stark, mit 31 Abbildungen. M. 4.—, geb. M. 5.20

Band II: BILLITER, Prof. Dr. J., **Die technische Chloralkali-Elektrolyse.** VIII und 79 Seiten stark, mit 20 Abbildungen. M. 2.50, geb. M. 3.70

Band III: KRAIS, Prof. Dr. Paul, **Textilindustrie.** VIII und 156 Seiten stark. M. 4.50, geb. M. 5.70

Band IV: JANKE, Prof. Dr. Alexander, **Allgemeine technische Mikrobiologie.** XII und 342 Seiten stark, mit 10 Abbildungen und einer Tafel. M. 12.—, geb. M. 13.20

Band V: WAESER, Dr.-Ing. Bruno, **Stickstoffindustrie.** VIII und 128 Seiten stark. M. 4.—, geb. M. 5.20

Band VI: LOEWE, Dr. F., **Optische Messungen** des Chemikers und des Mediziners. VIII und 170 Seiten stark, mit 34 Abbildungen. M. 6.—, geb. M. 7.20

Band VII: EICHWALD, Dr. Egon, **Mineralöle.** VIII und 152 Seiten stark, mit 9 Abbildungen. M. 6.—, geb. M. 7,20

Band VIII: STEINER, Dr. O., **Industrie der Fette und Seifen.** VIII und 84 Seiten stark. M. 4.—, geb. M. 5.20

Band IX: ZIMMER, Dr. Emil, **Bleiweiß und andere Bleifarben.** (Erscheint im Herbst 1925.)

Band X: WENTZEL, Dr.-Ing. Fritz, **Industrie der photographisch-chemischen Präparate, ihre Erzeugung und Verarbeitung.** (Erscheint im Herbst 1925.)

Weitere Bände sind in Vorbereitung, z. B.:

BUGGE, Dr. G., **Holzverkohlung** — ELZE, Dr. F., **Fortschritte der ätherischen Ölchemie** — EBERLEIN, Dr. L., **Die neueren Milchindustrien** — FÜRTH, Dr. A., **Braunkohle** — GERNGROSS, Prof. Dr. O., **Gerbereichemie und Praxis** — GOLLMER, Dr. M., **Die Verkokung der Steinkohle und die Verarbeitung der Destillationsprodukte** — HERMANN, Dr. C., **Kali-Industrie** — JANKE, Prof. Dr. A., **Konservierungstechnik** — LÜHDER, Dr. E., **Spiritusfabrikation** — MÜLLER, Gen.-Direktor Dr., **Zelluloid-Industrie** — NAOUM, Dr. Ph., **Schieß- und Sprengstoffe** — THIENE, Dr. H., **Glasindustrie** — WACLAW, Fr., **Zement** — WAESER, Dr. B., **Schwefelsäure, Sulfat, Salzsäure** — WENDEL, **Preßhefe**

und viele andere mehr.

VERLAG VON THEODOR STEINKOPFF, DRESDEN UND LEIPZIG

WISSENSCHAFTLICHE FORSCHUNGSBERICHTE

NATURWISSENSCHAFTLICHE REIHE

Herausgegeben von

Dr. R. Ed. LIESEGANG, Frankfurt a. M.

Band I: DÖRING, Prof. Dr. Th., **Analytische Chemie.** VIII und 97 Seiten stark. M. 2.40, geb. M. 3.60

Band II: BORN, Dr. A., **Allgemeine Geologie und Stratigraphie.** X und 145 Seiten stark. M. 4.—, geb. M. 5.20

Band III: PUMMERER, Prof. Dr. R., **Organische Chemie.** Zweite vermehrte und verbesserte Auflage. XII und 195 Seiten stark. M. 4.—, geb. M. 5.20

Band IV: LERTES, Dr. P., **Die drahtlose Telegraphie und Telephonie.** Zweite, vermehrte und verbesserte Auflage. XII und 200 Seiten stark, mit 48 Figuren. M. 3.50, geb. M. 4.70

Band V: LANDÉ, Dr. A., **Fortschritte der Quantentheorie.** XII und 92 Seiten, mit 8 Figuren. M. 3.—, geb. M. 4.20

Band VI: LIESEGANG, Dr. Raph. Ed., **Kolloidchemie 1914—1922.** VIII und 100 Seiten stark. M. 3.—, geb. M. 4.20

Band VII: GERLACH, Prof. Dr. Walther, **Materie, Elektrizität, Energie.** Die Entwickelung der Atomistik in den letzten zehn Jahren. VIII und 195 Seiten stark, mit 68 Figuren. M. 4.—, geb. M. 5.20

Band VIII: BENRATH, Prof. Dr. A., **Physikalische Chemie I.** Chemisch reine Stoffe. Lösungen. VIII und 107 Seiten stark. M. 3.—, geb. M. 4.20

Band IX: LIESEGANG, Dr. Raph. Ed., **Kolloide in der Technik.** VIII und 160 Seiten stark. M. 4.—, geb. M. 5.20

Band X: HONCAMP, Prof. Dr. F., und NOLTE, Dr. O., **Agrikulturchemie.** VIII und 160 Seiten stark. M. 4.—, geb. M. 5.20

Band XI: GEORGII, Prof. Dr. Wa., **Wettervorhersage.** VIII und 114 Seiten stark, mit 58 Abbildungen. M. 4.50, geb. M. 5.70

Band XII: HAUROWITZ, Dr. F., **Biochemie** des Menschen und der Tiere seit 1914. XII und 148 Seiten stark, mit 9 Abb. M. 7.—, geb. M. 8.20

Band XIII: EITEL, Prof. Dr. W., **Physikalisch-chemische Mineralogie und Petrologie.** VIII und 174 Seiten stark, mit 53 Abbildungen. M. 8.—, geb. M. 9.20

Band XIV: BENRATH, Prof. Dr. A., **Physikalische Chemie II.** Thermische und photochemische Gleichgewichts- und Geschwindigkeitslehre. X und 192 Seiten stark. M. 8.50, geb. M. 9.70

Weitere Bändchen sind in Vorbereitung.

VERLAG VON THEODOR STEINKOPFF, DRESDEN UND LEIPZIG

DIE GRUNDLAGEN DER DISPERSOIDCHEMIE

Von **Prof. Dr. ANDOR FODOR**
Direktor des Institutes für Biochemie und Kolloidchemie der Hebräischen Universität Jerusalem

280 Seiten stark, mit 34 Abbildungen
M. 12.—, in Leinen gebunden M. 14.—

GRUNDRISS DER KOLLOIDCHEMIE

Von **Dr. WO. OSTWALD**
Professor an der Universität Leipzig

Siebente Auflage. 1. Hälfte. M. 8.—

KLEINES PRAKTIKUM DER KOLLOIDCHEMIE

Von **Dr. WO. OSTWALD**
Professor an der Universität Leipzig

Mitbearbeitet von PAUL WOLSKI und Dr. A. KUHN

Fünfte Auflage

Groß-Oktav-Format. XII und 174 Seiten stark, mit 21 Textfiguren
Steif kartoniert M. 3.60

DIE WELT DER VERNACHLÄSSIGTEN DIMENSIONEN

Eine Einführung in die moderne Kolloidchemie mit besonderer Berücksichtigung ihrer Anwendungen

Von **Dr. WO. OSTWALD**
Professor an der Universität Leipzig

Siebente bis achte Auflage

253 Seiten stark, mit 34 Abbildungen und 6 Tafeln
Steif kartoniert M. 6.—

DIE METHODEN ZUR HERSTELLUNG KOLLOIDER LÖSUNGEN ANORGANISCHER STOFFE

Von **Dr. THE SVEDBERG**
Professor an der Universität Upsala

Dritte Auflage

507 Seiten stark, mit 60 Abbildungen, zahlreichen Tabellen und 3 Tafeln
M. 15.—, gebunden M. 17.—

Druck von C. G. Röder G. m. b. H., Leipzig.

Date Due			
May 10/20	Fitch		

UNIVERSITY OF B.C. LIBRARY
3 9424 03685 1670

CALL NO. QD 516 B 4
AUTHOR Beyersdorfer.
TITLE Staub-explosion
Library of THE UNIVERSITY O

Date Due	Reader's No
May 10/40	